الصــوت

الكندرا فرون

ترجمه

محمد عز الدين فؤاد

مراجعة

د. على شعيب

الكتاب: الصوت

الكاتب: الكندرا فرون

ترجمة: محمد عز الدين فؤاد

مراجعة: د. على شعيب

الطبعة: ٢٠١٨

الناشر: وكالة الصحافة العربية (ناشرون)

٥ ش عبد المنعم سالم – الوحدة العربية – مدكو ر- الهرم – الجيزة

جمهورية مصر العربية


هاتف : ٣٥٨٢٥٢٩٣ _ ٣٥٨٦٧٥٧٦ _ ٣٥٨٦٧٥٧٥

فاكس : ٣٥٨٧٨٣٧٣

E-mail: news@apatop.comhttp://www.apatop.com

دار الكتب المصرية

فهرسة إثناء النشر

فرون ، الكندرا

الصوت / الكندرا فرون

– الجيزة – وكالة الصحافة العربية.

١٢٦ ص، ١٨ سم.

الترقيم الدولى: ٦ – ٧٦٢ – ٤٤٦ – ٩٧٧– ٩٧٨

أ – العنوان رقم الإيداع : ٨٥٩٣ / ٢٠١٨

الصــــوت



مقدمة

نظرا للاهتمام الحالى الكبير بفنون تسجيل الصوت ثم إعادته بأمانة عالية ، وزيادة اهتمام الناس بالاستمتاع الى الأجهزة الصوتية ، فان هذا الكتاب الذى يعالج الخواص الطبيعية للصوت ، وخواص الاستماع يسد حاجة حقيقية .

وهذا الكتاب، الذى كتبه أحد مدرسى الفيزياء المرموقين فى البلاد، يتناول فى الباب الأول النواحى الأساسية للصوت، وقياس الخواص الطبيعية للصوت ، وأسس الصوتيات . ويشمل الباب الثانى منه مناقشة المجموعة العضوية لميكانيكية السمع، والنظر السيكولوجى للنواحى الفيزيائية للصوت . كما تذكر فى هذا الباب الآلآت الموسيقية الوترية والأصوات البشرية .

ويعود الباب الثالث الى النواحى الفيزيائية البحتة للصوت ، ويتناول بعض الظواهر مثل التداخل والرنين . كما يذكر فيه بالتفصيل موضوع أحداث الأصوات فى الأنابيب الأغنية وآلات النفخ . وقد أُعيدت مناقشة بعض الظواهر التى نُوقشت فى الباب الاول ، وهذا مثال لطريقة التدريس التى يسميه الكاتب " بالتوسيع الحلزونى فى الموضوع "، وهي طريقة أثبتت نجاحاً كبيراً على مر السنوات . وهذه الطريقة تسمح للطلاب أن يتعلم المادة بطريقة تطابق عملية التعلم المادية – فتنقل أولاً معلومات خاصة بالفكرة، ثم يلى ذلك – بعد تناول المعلومات التى تسد

الفراغ فى المواد الأخرى الضرورية – تناول معلومات تفصيلية توضح الأفكار الأصلية وتثبتها فى ذاكرة الطالب. وخلال صفحات الكتاب سنجد الموضوعات مزودة للتجارب العلمية، ونماذج من المسائل المحلولة و عدد كبير من الرسوم التوضيحية التى تم اختيارها بعناية فائقة. وقد أُعطيت الاسئلة والمسائل فى نهاية كل باب لاختيار مدى فهم الطالب للمادة .

الناشر

الباب الأول

مقدمة عن الصوت

١) طبيعة الصوت ومصادر طاقة الصوت :

سنتناول بالشرح فى هذا الباب النواحى الفيزيائية البسيطة للصوت وتشمل كيفية أحداثه و انتشاره ، وطبيعة الحركة الاهتزازية ، وكذلك خواص كل من الاهتزازات المسموعة و غير المسموعة . وسنعالج فى الباب التالى تفاصيل عملية السمع ، والسيكولوجية العامة للصوت . وسنناقش فى الباب الثالث النواحى الأكثر تعقيداً فى الحركة الموجية بالنسبة لانتقال الصوت .

وتعتمد دراسة الصوت كثيرا على الجهود والبحاث التى أجراها العالمان هلمهول(Helmholz) ولورد رايلى(Lord Rayleigh) خلال القرن الأخير. وقد تأسست جمعية الصوتيات الأمريكة (coustical Society) فى عام ٩، واليوم نجد أن كلا من الجامعات ومؤسسات البحث الصناعى، مثل معامل (بل) للتليفون(Bell telephone) تشتغل بالابحاث فى المجال النظرى والتطبيقى للصوت . وقد ازدادت أهمية الصوت فى المواصلات بسرعة فائقة لارتباطه بتطور الراديو والتليفزيون ووسائل تسجيل الموسيقى والكلام .

ويجب أن ندرك من البداية أن كلمة "الصوت" لها معنيان واضحان. فهناك المعنى الشخصى البحت أو السيكولوجى وكذلك

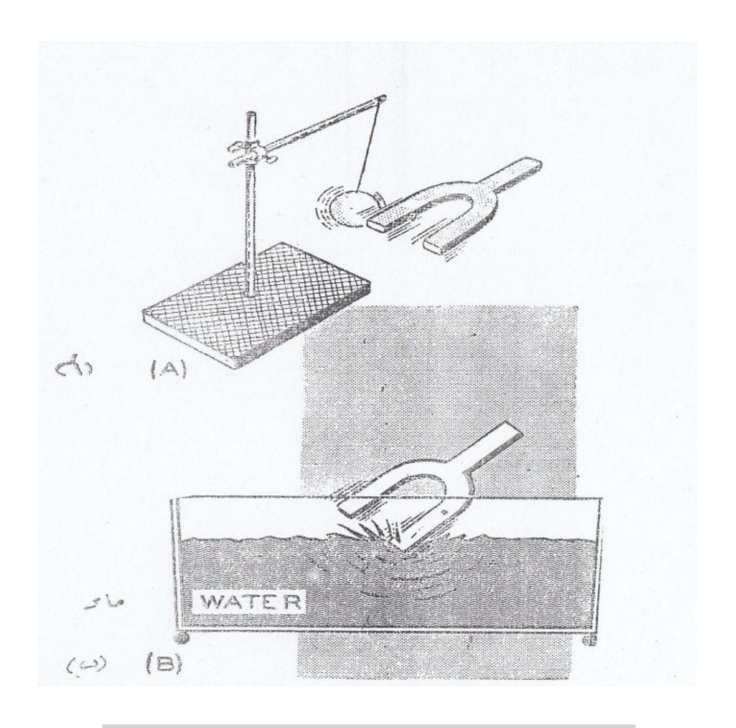
المعنى الموضوعى أو الفيزيائى. وهكذا فكلمة "الصوت" يمكن ان تعنى الاحساس للصوت (الأذن) من المكان . و "الصوت" يمكن أيضا ان يعنى الطاقة التى تصل إلى الأذن من الخارج . وهى الطاقة التى يستمر إنتشارها حتى فى حالة عدم وجود أذن لتمييزها . (ينطبق نفس التوضيح فى حالة الضوء كذلك) .

وحديثاً أصبحت النواحى العقلية أو السيكولوجية لأحداث الصوت مجالاً للدراسة والبحث تحت اسم سيكولوجية الصوتيات .

ما الذى يقع بالضبط خارج الأذن لإحداث صوت مسموع ؟

أن الجسم المحدث للصوت هو جسم اهتزازى ملامس لوسط ما ، له القدرة على إمرار هذه الطاقة الاهتزازية الى الأذن . واعمدة الهواء فى أنابيب الأرغن، وحجاب مكبرات الصوت، والأوتار الموسيقية، والطبول، والأجراس، والشوك الرنانة .... الخ ، كل هذه يمكنها تحت ظروف معينةلنتحدث الأصوات المسموعة .

تجربة رقم ١ : خذ شوكة رنانة ذات ثقل معتدل و اطرق أحد فرعيها ازاء سدادة من المطاط أو ازاء كعب حذائك المصنوع من المطاط . قرب أحد فرعى الشوكة ، التى ترسل الآن نغمة موسيقية ، الى كرة (بنج بونج) معلقة بخيط . سوف ترى أن الكرة تدفع الى حالة من الاهتزاز ، مما يثبت أن مصدر الصوت نفسه (الشوكة الرنانة) كان فى حالة اهتزاز (شكل رقم ١).

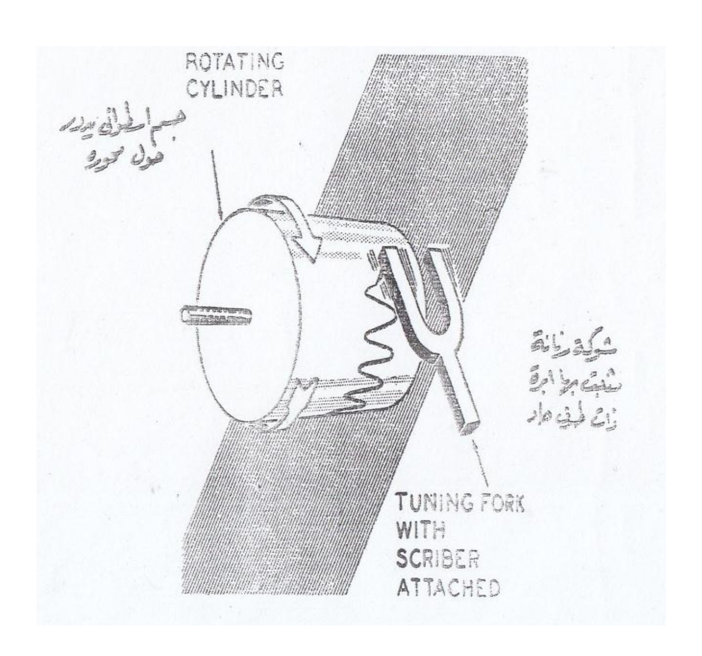


(شكل ١) الجسم المحدث للصوت في حالة اهتزاز

تجربة رقم ٢ : اطرق الشوكة الرنانة ثم اغمس فرعيها فى اناء به ماء. يقدم الرذاذ المتطاير الناتج دليلا آخر على على حقيقة أن الشوكة الرنانة يجب أن تكون فى حالة اهتزاز فى أثناء احداثها للصوت (شكل٢) .

ولا يكفى فقط أن تستنتج أن الجسم المحدث للصوت هو جسم مهتز ولكن يمكنك أن ترى فعلا الصورة المهزوزة لشوكة رنانة أو وتر موسيقى، وأن تلمس الاهتزازات بطرف الاصبع، بل يمكن تسجيل مثل هذه الاهتزازات بطريقة يمكن رؤيتها . فاذا ثبتنا ابرة ذات طلاف حاد (كابرة الاسطوانات أو قطعة من السلك المدبب) الى أحد فرعى الشوكة

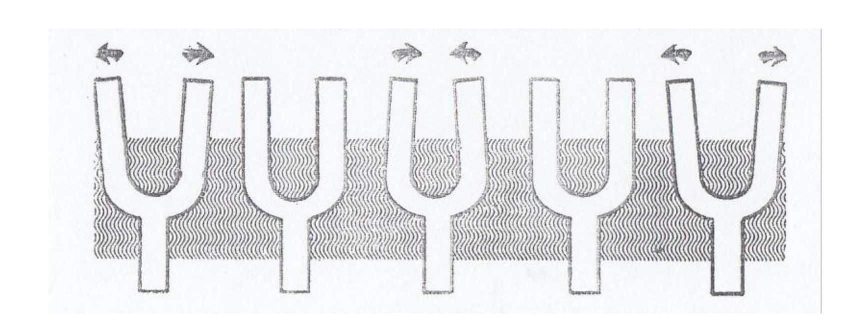
الرنانة المهتزة، وجعلنا هذه الابرة تلمس خطا أفقيا اذا بقى الجسم الاسطوانى الى ثابتا كما ترسم خطا أفقيا اذا بقى الجسم الاسطوانى ثابتاً، كما ترسم خطاً متموجاً اذا أدير الجسم الأسطوانى .



(شكل ٢) شكل الكيموجراف

و يعرف الجهاز الذى يسجل صورة الاهتزازات باسم الكيموجراف (Kymograph) . وهناك أداة تعرف باسم ستروبوسكوب (Stroboscope)تعطى ضوءا متقطعا يمكن ضبط تردد نبضاته ويمكن استخدامه لاضاءة شوكة رنانة مهتزة . وستجد أن حركة طرفى الشوطة ، الى اليمين و الى اليسار ، التى لم يكن ممكناً رؤيتها بوضوح بالعين دون مساعدة ما ، يمكن اظهارها " كحركة بطيئة " تستطيع العين رؤيتها .

والشكل (رقم ٣) يمثل خمسة مناظر متتابعة لشوكة رنانة مهتزة تفحص بضوء الستروبوسكوب .



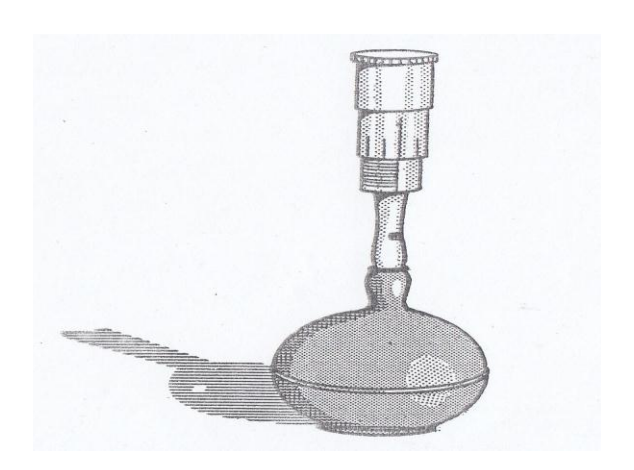
خمسة مناظر متتابعة لشوكة رنانة مهتزة تفحص بضوء الستروبوسكوب

ويلاحظ أن أثر الاهتزاز مبالغ فيه وما دمنا قد أثبتنا حقيقة أن الجسم المحدث للصوت هو جسم مهتز، يحق لنا أن نتساءل عما اذا كان العكس صحيحاً ، أى عم اذا كان من الضرورى أن يكون الجسم المهتز قادراً على إحداث الصوت. وفى الحقيقة لا ينطبق ذلك على جميع الحالات. ومن بين الشروط المتعددة الواجب توافرها للسماع، نجد أن موضوع التردد من الأهمية بمكان (والتردد هو عدد الاهتزازات التى تحدث فى الثانية الواحدة). ولكى يمكن للتقلبات أن تكون مسموعة، يجب أن يكون لها تردد ما فى المدى السمعى audibility)

(range أو فى مدى الترددات السمعية (audio – frequency)

وهذا المدى يمتد من ٢٠ ذبذبة كاملة (أى اهتزازات كاملة) فى الثانية الواحدة ، الى تردد أقصاه حوالى (٢٠,٠٠٠) و " الاصوات " التى تقل عن الحد الادنى لهذا المدى تعرف باسم الترددات تحت السمعية

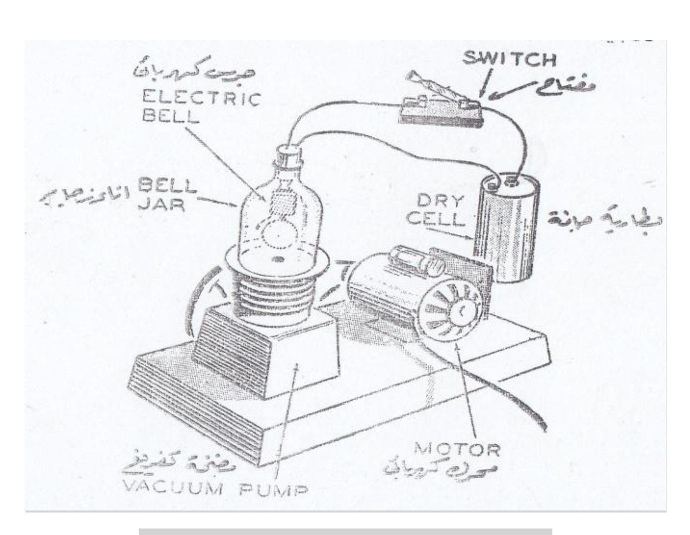
(subsonic) وتلك التى يزيد ترددها ٢٠,٠٠٠ ذبذبة فى الثانية (دورة فى الثانية) تعرف باسم الترددات فوق السمعية (ultrasonics). ويجب أن يكون واضحا أنه لا يمكن تمييز كلا المجموعتين كصوت مسموع، رغم أن طريقة الاهتزاز المرتبطة بهذه (الأصوات) تشبه تماما نظيراتها من الأصوات المسموعة . فهناك صفارة جالتون Galton) Whistle) (شكل ٤) وهى صفارة خاصة بالترددات العالية يمكن ضبطها لإحداث اهتزاز ذى معدل فائق العلو لا تسمعه الأذن البشرية، رغم أنه يمكن لأذن كلب أن تميزها بسهولة . ونحن أيضاً، يمكننا كشف مثل هذه الاهتزازات ، ولكن بوسائل أخرى للاستقبال غير الأذن البشرية .



(شكل٤) صفارة جالتون

و يعتبر الوسط الذى يربط بين مولد و مستقبل الصوت عاملاً آخر ذات أهمية فى العملية السمعية . و بمعنى أخر فان عدم وجود وسط ،

أى وجود حيز مفرغ ، يعتبر مانعاً للعملية السمعية . و يبين (شكل ٥) جرساً كهربياً معلقاً داخل إناء زجاجى ، يمكن تفريغه من الهواء بمضخة تفريغ . وسنلاحظ أن صوت الجرس سيسمع بوضوح فى بداية التجربة ثم يتضاءل كلما زاد التفريغ ، حتى يكاد يصبح غير مسموع بالمرة عندما يمر بعض الوقت على التشغيل مضخة التفريغ . و يدل انخفاض مستوى الوت دلالة كافية على أنه بالاضافة الى ضرورة الاهتزاز عند تردد مناسب، فان مصدر الصوت يجب أن يوصل الى الاذن بوسط مادى ما يقوم بامرار الاضطرابات الصوتية المولدة . و اذا ملأنا الاناء الزجاجى بغاز الهيدروجين فان صوت الجرس يكون ضعيفاً نظراً لقلة كثافة غاز الهيدروجين .



(شكل ٥) تجربة الجرس داخل إناء مفرغ

وهناك سبب آخر لعدم قدرة الجسم المهتز على احداث الصوت السموع و هو أنه قد ينقل قدراً ضئيلاً منالطاقة لا يمكن سمعه . وستتاح

لما الفرصة فى الباب التالى لتوضيح أن الأذن البشرية عضو ذو حساسية فائقة ، يستجيب للتغيرات القليلة فى ضغط الهواء ، التى قد تصل الى $\frac{١}{١٠٠٠٠٠٠}$ من وحدة الضغط الجوى ، كما يمكن أن يتسبب فى ألمه تغيرات قليلة فى الضغط قد تصل الى $\frac{١}{١٠٠٠}$ من وحدة الضغط الجوى .

و نظرا لأن معدل انسياب الطاقة الصوتية لكل وحدة مساحية (يعبر عنه بالوات لكل سنتيمتر مربع) يقل بسرعة كلما زادت المسافة من المصدر المهتز ، فان أدق الآذان حساسية لن تتمكن من تمييز الصوت عندما تكون على مسافة كبيرة من المصدر . وفى حالة إصابة النظام السمعى أو تلفه ، تقل المسافة الحرجة للسماع .

٢) نقل وسرعة الصوت :-

لقد أوضحنا من قبل أن نقل الطاقة الصوتية يعتبر مستحيلاً فى حالة عدم وجود وسط مادى أو ملموس بين المصدر و الاذن .

و يجب أن يكون لهذا الوسط خاصيتان هامتان :

(١) يجب أن يكون مرناً أى قادراً على العودة الى حالته الطبيعية بعد زوال أثر التقلبات الصوتية .

(٢) يجب أن يكون له كتلة أو قصور ذاتى (أو بصفة غير مباشرة، له كثافة) تمكنه من "تجاوز" حالته المتعادلة واتخاذه وضعا فى الاتجاه المضاد .

والهواء والماء والزجاج والخشب والصلب كلها تنقل الاهتزازات المحدثة للصوت بفضل مرونتها وكثافتها . وكلما زادت مرونة الوسط وقلت كثافته، زادت سرعة الصوت خلال هذا الوسط. ويلاحظ أن المواد قليلة المرونة وذات الكثافة العالية لا يمكنها أن تنقل الصوت بسرعة كبيرة للأسباب الآتية :

(١) ليس لها خاصية المرونة الكافية التى تساعد على عودتها الى حالتها الطبيعية .

(٢) كتلتها الكبيرة تمنعها من المشاركة فى الحركة المتناوبة السريعة ذهاباً و اياباً .

ويمكن إثبات أن سرعة انتشار الصوت فى وسط معين يعبر عنها بالعلاقة الآتية :

$$\text{السرعة} = \sqrt{\frac{\text{المرونة}}{\text{الكثافة}}}$$

وأدق الأرقام التى أمكن الحصول عليها لسرعة الصوت فى الهواء هى ١٠٨٨ قدم /ثانية عند درجة حرارة صفر مئوية . و يعادل هذا الرقم ٧٤٠ ميل / ساعة تقريبا . وكلما ارتفعت درجة الحرارة قلت كثافة الهواء دون أن تتأثر مرونته، ومن ثم فان سرعة الصوت فى الهواء الدافىء أعلى من سرعته فى الهواء البارد . ولقد وجدت الزيادة فى السرعة ٢ قدم /ثانية لكل درجة مئوية فوق درجة الصفر المئوية ، أى ١و١ قدم / ثانية لكل درجة حرارة فهرنهايت فوق ٣٢ درجة فهرنهايت . و هذا يعادل ٠,٦ متر/ ثانية لكل درجة حرارة مئوية ، فى النظام المترى .

ومن الطريف أن نلاحظ أن سرعة الصوت فى الغاز لا تعتمد على ضغطه، اذ أن تغيير الضغط يؤثر على كل من المرونة و الكثافة بنسبة واحدة. وانخفاض سرعة الصوت فى الارتفاعات الكبيرة سببه الوحيد هو انخفاض درجة الحرارة و ليس انخفاض الضغط .و فى حدود معينة لا تعتمد سرعة انتقال الصوت فى الغاز على تردده أو شدته .

وسرعة الصوت فى غاز كثيف مثل ثانى اكسيد الكربون هى ٨٤٦ قدم/ثانية عند درجة الصفر المئوية، أما فى غاز خفيف مثل الهيدروجين فتكون السرعة ٤١٦٥ قدم /ثانية . ويلاحظ أن سرعة الصوت فى الهيدروجين عالية رغم أن علو الاشارة الصوتية المنقولة يكون منخفضاً

مسألة ١ : قام رجل بقياس المدة الزمنية بين رؤية البرق و سماع الرعد فوجدها عشر ثوان . و كانت درجة حرارة الهواء ٢٥ درجة مئوية . احسب بعد هذا ، التفريغ الكهربائى الجوى ؟

الحل : سرعة الصوت عند درجة ٢٥ مئوية = ١٠٨٨ +(٢×٢٥) = ١١٣٨ قدم/ ثانية

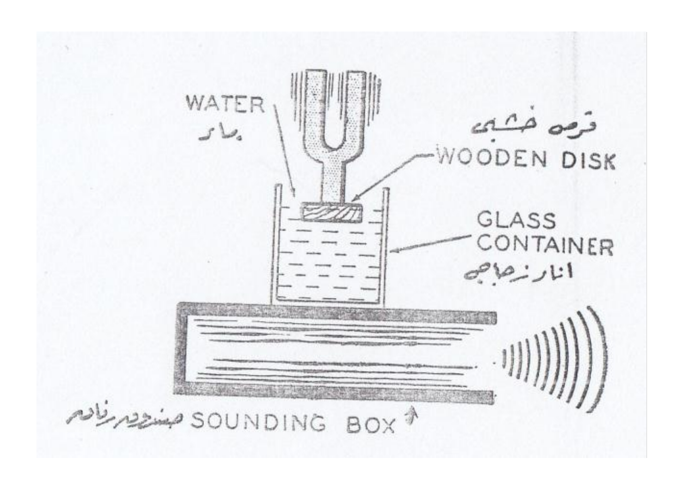
مساحة التفريغ البرقى = ١١٣٨ × ١٠ = ١١٣٨٠ قدما .

مسألة ٢ :يعود صدى صوت صفارة صادرة من باخرة لتحطيم الجليد بعد عشر ثوان من مصدر الصوت الاصلى . و درجة حاراةالهواء – ٥ مئوية . ما هو بعد السطح العاكس؟ (الجبل الجليدى) ؟الحل : تمثل الثوانى العشر الزمن الذى استغرقه ذهاباً و اياباً و من ثم فان الزمن المطلوب حتى يصل الصوت الى الجبل الثلجى هو ٥ ثوان فقط .

المسافة من الباخرة الى الجبل الجليدى =(١٠٨٨ – ١٠)×٥= ٥٣٩٠ قدما .

وتنتقل الأصوات فى السوائل بسرعة أكبر من سرعتها فى الغازات وسرعة الصوت فى الماء الخالى من الهواء هى ٤٧٩٤ قدم/ ثانية . وفى حالة ماء البحر (الماء المالح) ستستخدم السرعة المتوسطة ٤٨٠٠ قدم / ثانية .

تجربة رقم ٣ : ثبت قرصاً خشبياً الى شوكة رنانة كما هو مبين فى (شكل ٦) . ضع اناء زجاجيا مملوء الى نصفه بالماء فوق صندوق رنان. أطرق الشوكة الرنانة لتهتز ثم اغمس القرص فى الماء . ستلاحظ أن الصوت سيسمع قادماً من الصندوق الرنان ، اذ يتم انتشاره خلال الماء وكذلك خلال الهواء .



(شكل ٦) إنتشار الصوت خلال الماء

وفى أثناء الحرب العالمية الاولى تم استخدام فكرة نقل الصوت خلال الماء بطريقة تدعو الى الاعجاب ، اذ استخدم ميكرفون حساس (كاشف للصوت) معلق فى جانب سفينة لإلتقاط الأصوات التى تصدر عن محرك غواصة العدو. وكانت الأداة المعروفة بالهيدروجين (hydrophone) ذات صفات اتجاهية، اذ أنها تستقبل الصوت فى أقصى مستواه عندما تكون واجهتها موجهة نحو مصدر الصوت مباشرة . وباستخدام جهازى هيدروفون، مثبتين على جانبى الباخرة، أصبح من

الممكن تحديد مكان مصدر الصوت بدقة، تماما مثلما يمكن تحديد مكان شخص متكلم باستخدام أثر السماع بالاذنين(binaural effect)

وفى طريقة (السونار) (sonar) لقياس اعمق فى ابحر، يمر فى الماء شعاع رفيع من الاهتزازات النابضة فوق السمعية التى تنعكس كشعاع مماثل من قاع البحر أو من قمة جبل مغمور تحت الماء وان هذه القدرة على تتبع مسار محدد هى التى تجعل الاهتزازات فوق السمعية تفوق الاصوات المسموعة فى هذا الغرض . ويقيس الجهاز الزمن الكلى (ذهاباً واياباً) اللازم لانتقال الصوت الى قاع البحر وعودته ، ويترجم هذه القياسات التى تتم بمعدل عشرين مرة فى الثانية الى قراءات للعمق تظهر على لوحة بيان الجهاز .

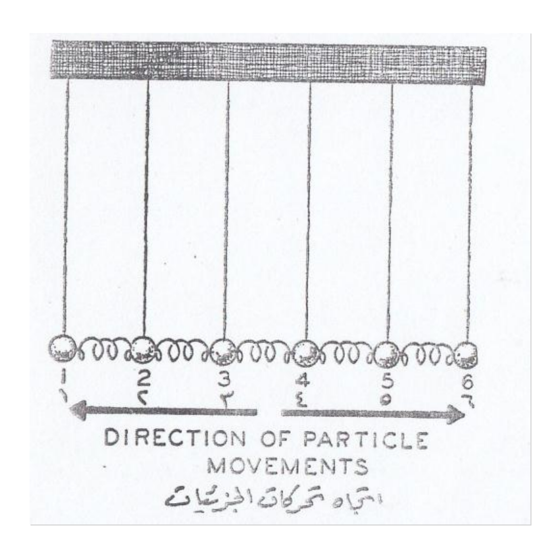
ويشبه (السونار) (sonar) فى فكرته الأساسية طريقة (الردار) (Radar) لتقدير المسافات وتحديد أماكن الأجسام فوق الماء .

وينتقل الصوت بسرعة أكبر فى معظم الجسام الصلبة، اذ أن سرعة الصوت فى الألمونيوم هى ١٦٧٤٠ قدم/ ثانية، وفى النحاس ١١٦٧٠، وفى الفضة ٨٥٥٣ ..... الخ .

٣) الموجات الطولية:-

ولنبحث الآن ميكانيكية انتشار الصوت خلال وسط مرن . ولكى نفهم ذلك ، يجب علينا أن نأخذ فى الاعتبار طبيعة الموجات الطولية

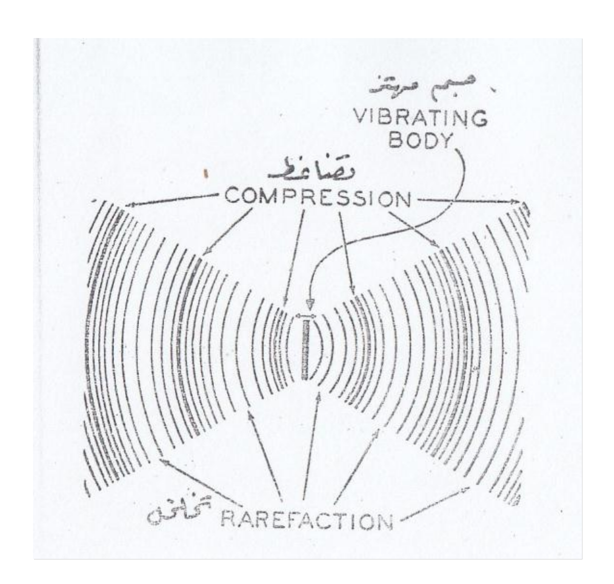
التى تحمل الاضطراب الاهتزازى من مولد (longitudinal waves) الصوت الى مستقبله .



(شكل ٧) نموج الموجات الطولية

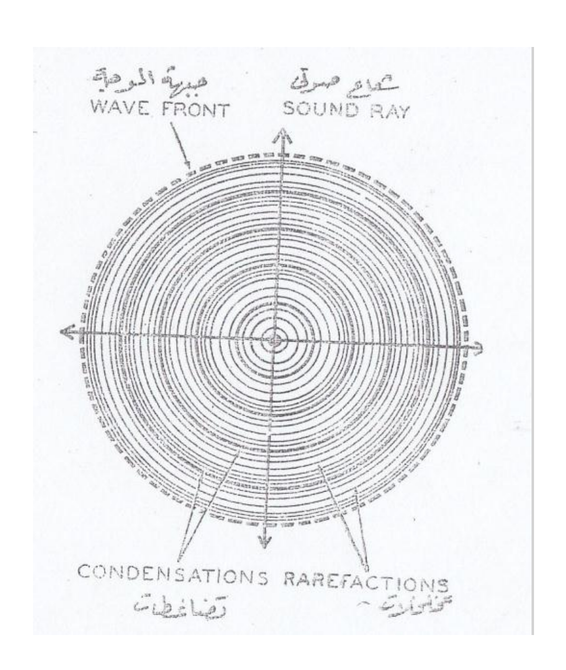
ولنفكر فى عدد من الكرات متساوية الكتلة معلقة بخيوط رفيعة وموصلة بعضها ببعض بزنبركات لينة اللف (شكل ٧) . فاذا دفعنا الكرة (١) باليد نحو الكرة (٢) ، فان الزنبرك الذى بينهما سينضغط، مما يجعل الكرة (٢) تتحرك بدورها نحو الكرة (٣) . و هذا سيضغط الزنبرك التالى ، مما يجعل الكرة (٣) تتحرك نحو الكرة (٤)، وهكذا. ومن ثم ستبدو موجة من التضاغط أو التكاثف تنتقل على طول الخط الموصل بين مراكز الكرات ، مع تحرك كل كرة قليلا نحو اليمين على طول هذا الخط . واذا أوقفنا هذه الحركة ، ثم اعدنا التجربة بتحريك الكرة (١) نحو اليسار ، فان الزنبرك الموصل بين الكرة (١) والكرة (٢)

سيتسع و يمتد مما يسبب تحرك الكرة (٢) نحو الكرة (١) الى اليسار . وسيسبب هذا بدوره تحرك الكرة (٣) الى اليسار تتبعها على التوالى الكرات (٤)، (٥)، (٦) . وهكذا سنرى موجة من التخلخل أو التمدد تتحرك الى اليمين، رغم أن الجزيئات الفردية ستعتريها حركة انتقالية بسيطة الى اليسار. ويلاحظ أن الجزئيات تتحرك أولا الى اليمين حركة بسيطة متتابعة، ثم تتحرك بنفس الطريقة حركة بسيطة متتابعة الى اليسار . وفى كلا الحالتين تتحرك الموجة نفسها – المكونة من مراحل التضاغط والتخلخل – الى اليمين. وتسمى حركة الذهاب والاياب لأجزاء وسط مرن (فى النموذج، مجموعة الكرات والزنبركات) اضطرابا طوليا. وينتشر الصوت بمثل هذه الموجات الطولية (شكل ٨) .



(شكل ٨) إنتشار التضاغطات والتخلخلات (موجات الصوت)

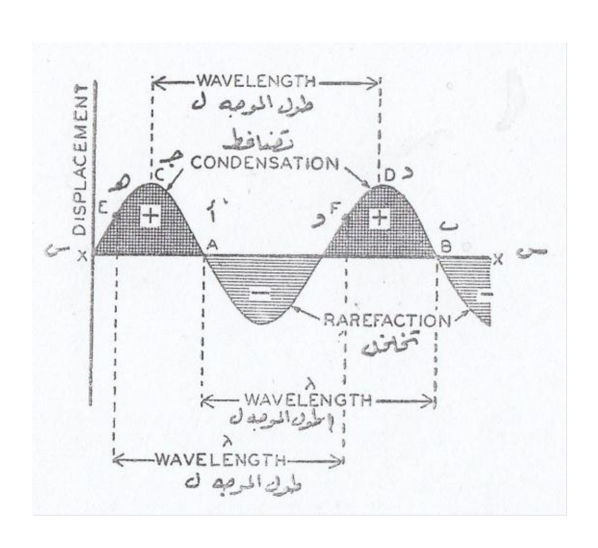
وفى الحقيقة يولد الجسم المهتز موجة كروية (spherical) مكونة من سطوح كروية من التضاغط والتخلخل ، تنبعث من مصدر الصوت فى جميع الاتجاهات (شكل ٩) (فى مناطق التضاغط تتجمع جزيئات الغاز ، وفى مناطق التخلخل تتباعد بعضها عن البعض الآخر) . ونسمى أيا الاتجاهات المتعددة التى يمكن أن تنتقل فيه هذه الموجة "شعاعاً صوتياً " تماما كما نسمى الاتجاه الذى ينتقل فيه الضوء "شعاعاً ضوئياً " . والحظ المتقطع فى الرسم هو أحد الخطوط المتعددة التى تصل بين الجزيئات ذات الحالة المتماثلة أو التى لها نفس الطور الاهتزازى (phase) (وجميعها تقوم بنفس العمل فى نفس الوقت) . ونسمى مثل هذا الخط جبهة الموجة . وتكون جبهات الموجات وخطوط الأشعة متعامدة بعضها على بعض فى كل مكان . ويكون نصف قطر انحناء جبهات الموجات ، عند مسافة بعيدة عن مصدر الصوت كبيراً الى ان تصبح جبهات الموجات سطوحا مستوية فى النهاية .



(شكل ٩) السطوح الكروية الصوتية، والآشعة الصوتية، وجبهات الموجات الصوتية

٤) التمثيل البيانى لموجة طولية :-

اذا رسمنا الزحزحة اللحظية للوسط الناقل للصوت من وضع السكون أى الوضع غير المضطرب كاحداثيات رأسية ، و أخذنا فترات زمنية منتظمة التباعد كاحداثيات أفقية ، فاننا نحصل على أبسط اهتزاز ممكن، ألا و هو منحنى الموجة الجيبية (شكل ١٠) .



(شكل ١٠) رسم بياني للزحزحةبالنسبة للزمن لموجة طولية بسيطة

وهذا رسم بيانى للزحزحة بالنسبة للزمن، وليس " صورة " للحركة الموجية الفعلية. ويبين محور المنحنى، س، خط وضع السكون أو المرجع. والزحزحة الموجبة التى تحتوى على الجزء الأعلى للمنحنى ، هى اختيارياً تلك التى تحدث فى أثناء التضاغط ، و بالمثل فان الزحزحة السالبة المتصلة بالجزء الأسفل للمنحنى ، هى تلك التى توجد فى أثناء التخلخل .

ونسمى المسافة من النقطة أ فى الرسم، ذات الوضع الرأسى (صفر)، الى النقطة التالية مباشرة ب التى لها نفس الوضع الراسى (صفر)، بطول الموجة ل للموجة الطولية المذكورة . ويمكن كذلك قياس طول الموجة من قمة منحنى التضاغط (النقطة ج فى الرسم) الى قمة منحنى التضاغط التالية (النقطة د فى الرسم) ، أو من أى نقطة مثل هـ

فى مساحة الاضطراب الى النقطة التالية ، و حيث يكون الاضطراب له نفس الخصائص تماما .

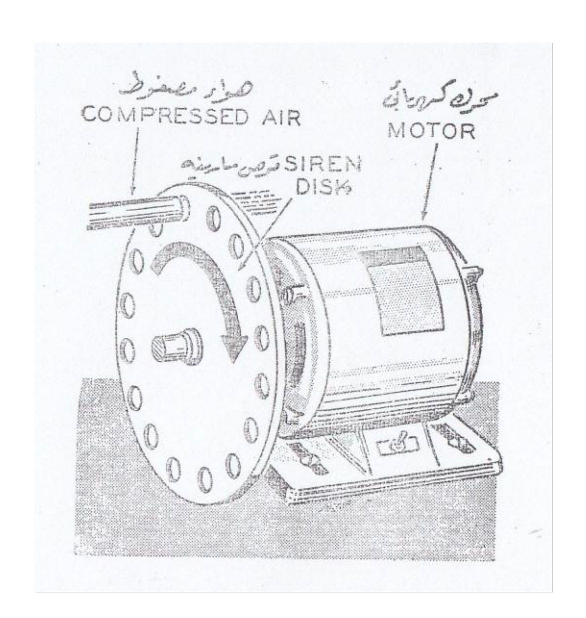
ويعرف أقصى زحزحة من وضع السكون باسم اتساع (ع) الموجة، وتردد (ت) الموجة هو عدد الدورات الكاملة للتضاغط و التخلخل، او عدد وحدات الذبذبات التى تحدث فى الثانية الواحدة (س / ث)، اذا كان تردد الموجة ٤٠٠ (س/ ث) مثلا ، فان المدة الزمنية لكل ذبذبة ، أى دورتها (د) ، هى مقلوب ٤٠٠ ، أى $\frac{١}{٤٠٠}$ من الثانية .

٥) معنى التردد:-

اذا ظللنا نجذب وترا فى القيثارة ، بينما أخذنا نقصر طول الوتر تدريجاً ، فان الصوت يصبح أكثر حدة أى عالى الدرجة . و اذا وضعنا لوحاً خشبياً سميكاً تحت منشار دائرى كهربائى سريع الدوران ، فان ذلك يحدث صوتا تنخفض درجته بانتظام . و كلمة درجة هى اصطلاح يشير الى الاحساس السمعى ، كما سنتناول ذلك بالتفصيل فى الباب التالى . ولا يهمنا حاليا الا السبب الأساسى الفيزيائى لهذا الاحساس .

تجربة ٤ :أدر قرص آّلة تنبيه (سارينة) له ثقوب منتظمة المسافات حول محيطه (شكل ١١) ستجد أن نفخة من الهواء المضغوط موجهة نحو هذه الثقوب ، ستنشطر الى مجموعة من النفخات المنتظمة التباعد عندما يدور القرص بسرعة عالية و لكنها ثابتة . واذا زيدت سرعة

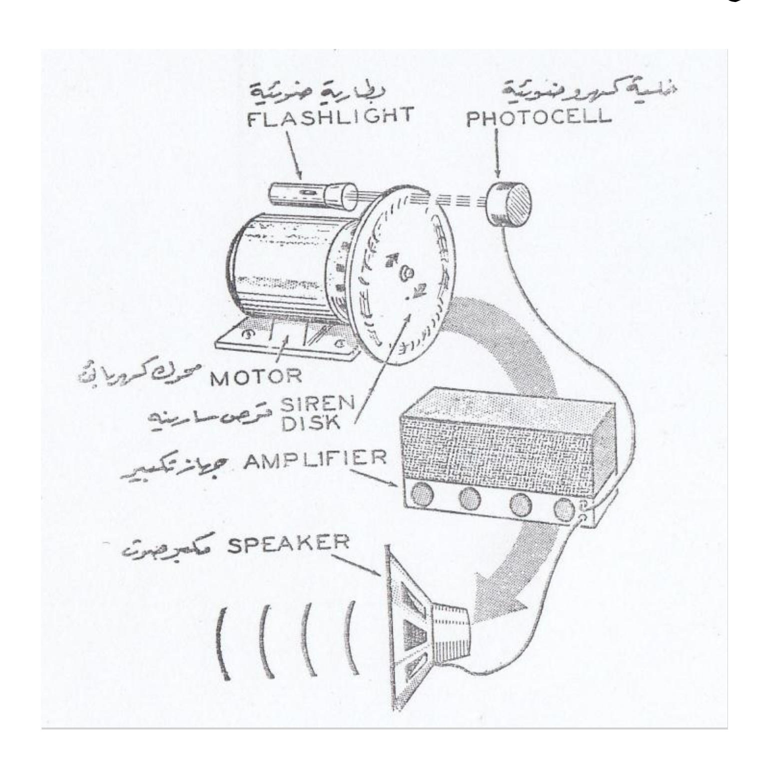
القرص، فان نفخات الهواء " تتولف " الى نغمة ذات درجة عالية . وسيظهر أن تردد الاهتزازات (و هو عدد نفخات الهواء فى الثانية الواحدة) يتحكم فى الدرجة . و على كل ، فما دامت الدرجة احساساً ، و التردد كمية فيزيائية بحتة ، فلا يمكن القول بأن أحدهما يتناسب مع الآخر . و كل ما يمكن أن نؤكده هنا هو أن التردد هو السبب البارز فى الاحساس بالدرجة . وهناك عوامل أخرى تؤثر ، بنصيب أقل ، على تحديد الدرجة .



(شكل ١١) سارينة

تجربة ٥ : يمكن كبديل للتجرة رقم ٤ ، أن نرتب اسقاط شعاع رفيع من الضوء على فتحات القرص الدائر . و سنلاحظ أن " نبضات " الضوء ستمر الى " خلية كهروضوئية " (العين الكهربائية) ستقوم بدورها

بامداد تيار نابض الى مرحلة تكبير ثم الى مكبر للصوت . و سنرى أن الصوت الصادر من مكبر الصوت يرتبط بعلاقة واضحة مع تردد قطع الشعاع الضوئى و الجهاز المذكور مبين بالشكل ١٢ .

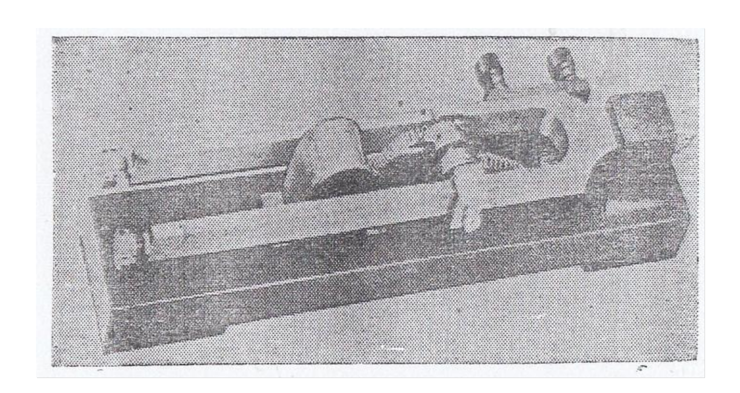


(شكل ١٢) السارينة والخلية الكهروضوئية

ويمكننا قياس التردد بسهولة تامة، اذ يمكن مقارنة أى نغمة ما مع النغمة الناتجة من سارينة (قرص) صفارة. فاذا كان للصفارة مثلا ٥٠ ثقبا منتظمة التباعد حول محيط قرصها وتدور بسرعة ٦ لفات فى الثانية، فان تردد الصوت يكون ٥٠ × ٦ = ٣٠٠ (س/ ث) والطريقة دقيقة تماماً، رغم أن " الموازنة " يجب أن تتم بواسطة الأذن.

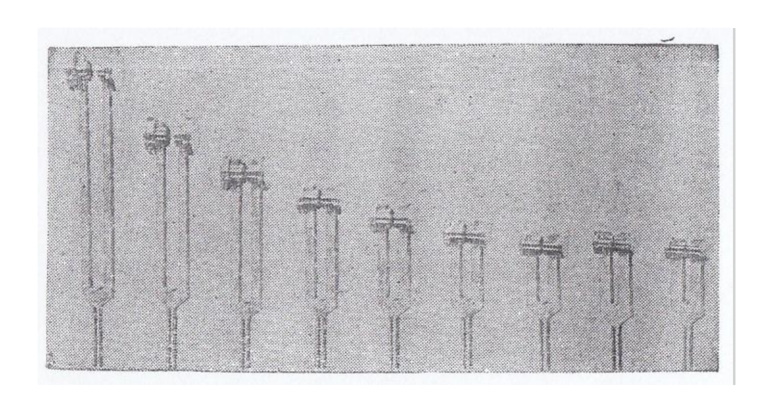
وتعتبر الشوكات الرنانة الدقيقة التى تحدث تردداً للاهتزاز تصل دقته الى جزء من ١٠٠٠,٠٠٠ ، من أحسن المعاير القياسية المتاحة للاستخدام فى المعمل .

ولقد وصلت الشوكة الرنانة – التى اخترعتها جون شور John shore فى عام ١٧١١ الى مستوى عال من التطور على يدى صانع الأجهزة الدقيقة الفرنسى رودلف كونيج (Rudolph Konig) (١٨٣٢ –١٩٠١) . ويتراوح حجم مقاس الشوكات الرنانة التى صنعها كونيج من الصلب الخاص، بين شوكة ضخمة (٥ أقدام) وشوكة صغيرة ترسل نغمة ٢١٨٤٥ س/ث. والشوكات الرنانة الحديثة الدقيقة تكون متوازة حرارياً (Temperature- compensated)، اذ أنها تصنع من شرائح معدنية مجمعة معاً ، و كل منها له المعامل الحرارى المناسب بالنسبة للتردد. ويبين (الشكل ١٣) شوكة من معدنين تعمل بالكهرباء. ومتوازنة حرارياً. والتردد الأساسى للشوكة هو ١٠٠ س/ث.



(شكل ١٣) شوكة مكونة من معدنين ومتوازنة حراريا (١١٠س/ث) – معامل ريفير بانك

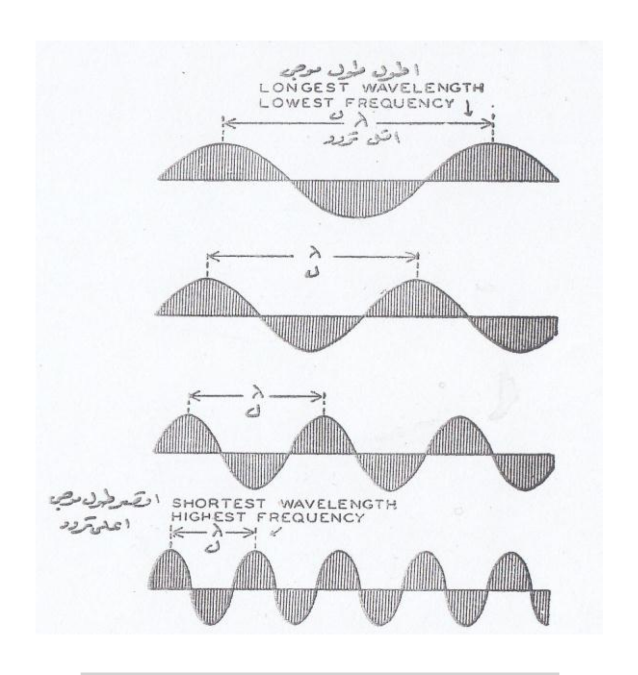
ويعتمد تردد الشوكة الرنانة على مرونة نادرة الشوكة و كثافة كتلة فرعيها (الكتلة لكل وحدة حجم) و كلما زادت سرعة الصوت فى المادة المكونة للشوكة ، زاد سُمك الفرعين ، وكلما قصر طول الفرع ، ارتفع تردد الشوكة . و اذا " حملنا " الفرعين بقليل من الشمع أو " راكب "خاص، فان الشوكة تحدث اهتزازات أقل قليلًا فى الثانية الواحدة . و الشوكات غير المتوازنة لتغيرات الحرارة تعانى تغيرات فى المرونة وبالتالى تغيراً فى التردد . و يبين (شكل ١٤) مجموعة من شوكات سبيكة الألمونيوم فى مدى الترددات من ٦٤ س/ث الى ٢٠٤٨ س/ث و يلاحظ قصر فرعى الشوكة الرنانة ذات التردد العالى .



(شكل ١٤) مجموعة شوكات رنانة من سبيكة الألومنيوم (٦٤–٢٠٤٨ س/ث) معامل ريفير بانك

ولنبحث الآن فى العلاقة بين التردد وطول الموجة، وسرعة الصوت. لقد عرفنا من قبل طول الموجة بالمسافة بين أى نقطتين متتاليتين فى وسط اهتزازى، لهما نفس نوع ومدى الوضع الانتقالى.

ويمكننا أيضا أن نفكر فى طول الموجة باعتباره المسافة التى تقطعها الموجة فى دورة اهتزازية كاملة للجسم المحدث للصوت . و نظرا لأن المسافة التى قطعها صوت عال التردد فى الثانية الواحدة (أى سرعته) هى نفس المسافة التى يقطعها صوت منخفض التردد فى الثانية الواحدة، فان المسافة لكل دورة اهتزازية (أى طول الموجة) الخاصة بالصوت عالى التردد يجب أن تكون أقصر من تلك التى تخص الصوت منخفض التردد ، و لذلك يمكننا أن نمثل الصواغت عالية التردد بموجات قصيرة، و الأصوات منخفضة التردد بموجات طويلة (شكل ١٥) .



(شكل ١٥) العلاقة بين الطول الموجى والتردد

و يرتبط طول الموجة ، و التردد و سرعة الصوت بالمعادلة الاتية :

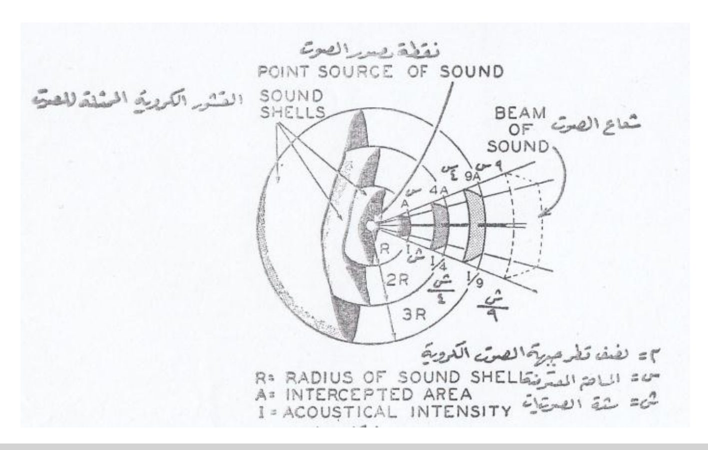
طول الموجة (ل) × التردد (ت) = السرعة (ع) (١-٢) .

كذلك طرديا مع مربع أقصى ضغط ناتج فى الوسط . ويمكن قياس الزحزحة أو الاتساع بالسنتيمترات ، أما الضغط فيقاس بالداين لكل سم٢ . وكلاهما صغير، حتى ولو كان الصوت انفجارا "يصم الآذان".

ويمكن اعتبار الموجات الجيبية فى (شكل ١٥) كرسم بيانى للشدة أو الاتساع أو الضغط مرسوما بالنسبة لزمن . وثلاثتها تتغير معا، وكلها تعتبر مقياسا لنفس الكمية الفيزيائية . والاتساع اللحظى للموجة عند اللحظة المعينة . ويصاحب الانتقال الوضعى المتغير تغيرات فى الضغط. وهذا بدوره يسبب تغيرات فى معدل انسياب القدرة لكل وحدة مساحات معترضة (أى فى الشدة). ويلاحظ أن كلا من المصطلحات الثلاثة هو قيمة فيزيائية بحتة. ولها نظير سيكولوجى واحد، ألا وهو (علو الصوت) (Loudness) الذى سنناقشه بالتفصيل فى الباب القادم. وسنعتبر علو الصوت مرتبطاً بالشدة، رغم أنه ليس "متناسباً" معه، كما هو الحال فى درجة الصوت (الاحساس المرتبط بالتردد) .

وحيث ان شدة الصوت هى معدل انسياب الطاقة لكل وحدة مساحة من السطح المستقبل لهذا الانسياب ، فيتبع ذلك أنه كلما زادت المسافة عن مصدر الصوت انخفض توزيع انسياب الطاقة أى "يتضاءل" وعند زيادة المسافة من مصدر الصوت الى ضعفها ، تكبر مساحة الجبهة الكروية التى تنتشر الطاقة خلال سطحها الى أربعة أمثالها ، و من ثم فان توزيع انسياب الطاقة (مقدرة بالوات لكل سم٢) ينخفض الى

الربع فقط . و بالمثل ، عند زيادة المسافة الى ثلاثة امثالها ، فان مساحة وجه الموجة المعترض تكبر الى تسعة أمثالها و تصبح شدة الصوت $\frac{١}{٩}$ من قيمتها الآلية . ويبين (شكل ١٦) كيف تتغير شدة الصوتيات مع المسافة من نقطة مصدر الصوت ؟ و يوصف هذا التغيير كعلاقة التربيع العكسى (بين ش ، $\frac{١}{م^٢}$) . و سنلاحظ فيما بعد ان القوة بين الأقطاب المغناطيسية ، و شدة الاستضاءة الناتجة من مصدر للضوء ، و كذلك القوة الجاذبة بين طتلتين ، كل ذلك يتبع نفس القانون . و يلاحظ على كل حال ، ان الذى ينطبق عليه علاقة التربيع العكسى هو نقط الاقطاب، و تقط مصادر الضوء ، و نقط الكتلة ، و نقط مصادر الصوت . أما الأجسام الكبيرة (أو الممتدة) فلا ينطبق عليها .



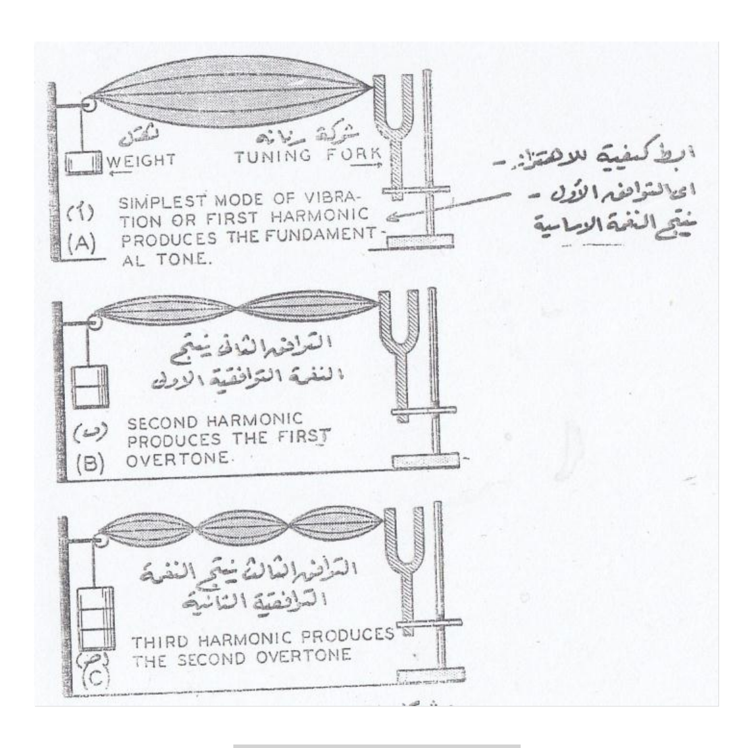
(شكل ١٦) التغير شدة الصوتيات مع المسافة من نقطة مصدر الصوت (قانون التربيع العكسي)

٦) الشكل الموجى أو كيفية الاهتزاز :

و سنتناول الآن السبب الفيزيائى لاحساس سمعى آخر . ألا و هو: (النوع) (quality) . و النوع هو الذى يمكننا من التعرف على آلة موسيقية أو شخص يحدثنا بالتليفون . و يمكن التمييز بين نغمتين بوساطة نوع أو (معدن) كل منهما ، حتى و لو كانتا متماثلتين فى الدرجة و العلو .

و النظير الفيزيائى للنوع هو الشكل الموجى أو كيفية الاهتزاز . وقد تكون اهتزازات بسيطة ، و لكنها فى معظم الحالات تكون ذات صفات مركبة . و فى الحالة الثانية يهتز الجسم المحدث للصوت ككل، بالاضافة الى اهتزاز أجزائه و قطاعاته . ولقد بين ف. ميلدى (F.Melde فى عام ١٨٥٩ الاهتزازات الجزئية لوتر مشدود ، فربط أحد طرفى الوتر بأحد طرفى شوكة رنانة مهتزة ، و مرر الطرف الآخر فوق بكرة ، و أضاف أثقالاً مختلفة الى نهاية هذا الطرف . و يبين (شكل ١٧) وتراً مشدوداً مهتزاً ....

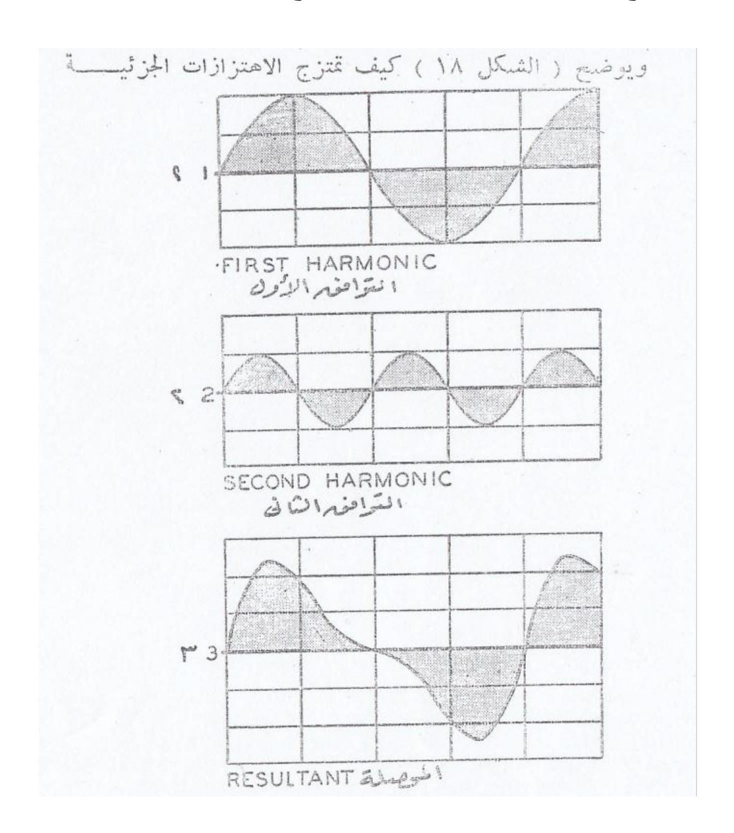
فى الحالة الأولى يهتز الوتر ككل ، ثم يهتز نصفاه ، و فى النهاية يهتز كل ثلث منه . ومن الممكن أيضا الحصول على اهتزازات جزئية أخرى بضبط شد الوتر .



(شكل ١٧) تجربة ميلدي

وتقوم أبسط كيفية للاهتزاز باحداث النغمة الاساسية (Fundamental) كما تقوم الاهتزازات الجزئية باحداث المركبات المسموعة ذات التردد العالى المعروفة باسم النغمات التوافقية (overtones) ذو المضاعفات الكاملة (الناتجة عن الضرب فى عدد صحيح) للتردد الاساسى تعرف باسم (التوافقيات (Harmonics) و تنتج النغمة الاساسية عن التوافق الاول ، والنغمة التوافقية الأولى عن التوافق الثانى ، والنغمة التوافقية الثانية عن التوافق الثالث، وهكذا . ويتحدد نوع الصوت بالعدد والشدة النسبية للتوافقيات المختلفة الموجودة فى اهتزاز مركب محدث للصوت .

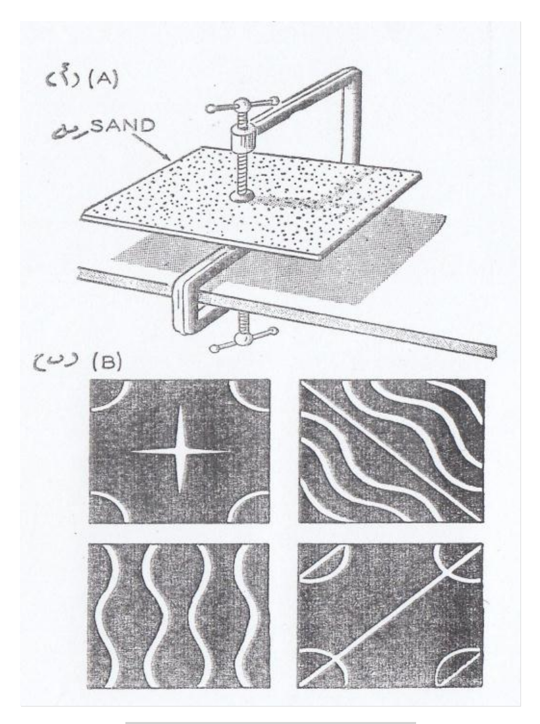
و يوضح (الشكل ١٨) كيف تمتزج الاهتزازات الجزئية ؟



(شكل ١٨) الشكل الموجي لامتزاج اهتزازات التوافق الأول (الأساسي) واهتزازات التقافق الثنائي

لتكوين موجة صوتية . و المنحنى ١ هو رسم بيانى لأبسط اهتزاز ، أى اهتزاز التوافق الأول ، و المنحنى ٢ هو رسم بيانى لاهتزاز التوافق الثانى . و المنحنيان لتكوين المنحنى المركب ٣ ، وهو "صورة" للصوت المركب الذى يتولد من المصدر و ينتقل الى الاذن عن طريق الوسط المعترض .

وهناك كذلك وسائل أخرى تساعدنا على تفحص الاهتزازات الجزئية المطلوبة لاحداث النغمات الموسيقية ذات النوع المركب . ولقد كان أرنست ف . كلادنى (Ernest F. Chladni)(١٧٥٦-١٨٢٧) أول من استخدم النماذج الرملية لرسم الاهتزازات المركبة على األواح مستوية و يبين (شكل ١٩ - أ) لوحا رفيعا من الصلب مربع الشكل مثبتا من مركزه و مغطى بالرمل الناعم . و يلمس اللوح عند احد أطرافه ، و يمرر قوس على الطرف الآخر ، مما ينتج عنه دفع كل من اللوح و الرمل الى اهتزازات مركبة .



(شكل ١٩) (ا) لوح كلادني
(ب) أشكال كلادني النموذجية

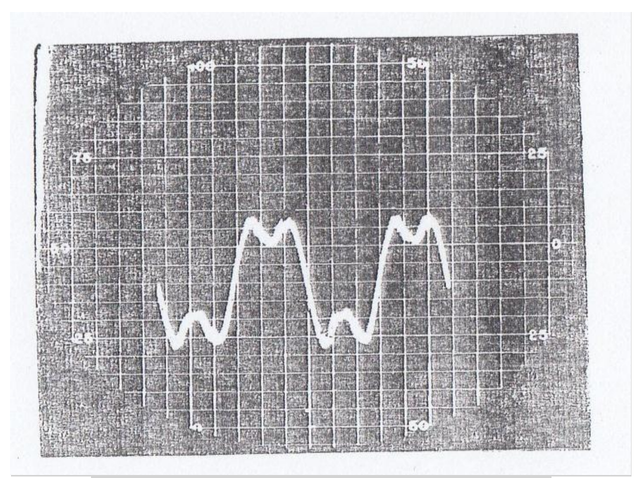
ويبين (شكل ١٩ – ب) مجموعة منوعة من الأشكال المعروفة باسم (اشكال كلادنى) ، التى تم الحصول عليها فى أوضاع مختلفة للقوس و بتغيير مكان اللمس بطرف الاصبع . و فى كل حالة يتجمع الرمل فى أكوام صغيرة عند كل (عقدة) (Node) (و هى نقط أو خطوط السكون أو انعدام الاضطراب) ، كما يتناثر الرمل بعيدا عن كل (بطن) (Loop or antinode) (و هى نقط أو خطوط أقصى اضطراب) كما يمكن لحافة ناقوس أو كأس أن يحدث اهتزازات مركبة . و يمكن تحديد أماكن العقد و البطون لحافة كأس مهتزة باحاطتها بكرات من الفلين معلقة على ابعاد منتظمة (كل منها يمثل بندولا) ، و هى تبقى ساكنة عند نقط العقد و تهتز بشدة عندما تلمس نقط البطون .

الطريقة الحديثة لدراسة موجات الصوت المركبة تستدعى استخدام ميكرفون ومبين شعاع المهبط (الاوسيلرسكوب) (Cathode ray oscilloscope) و تترجم الموجات الصوتية التى تصطدم بالميكرفون الى ذبذبات كهربائية، تسبب، عند تكبيرها "قلما" من الالكترونات "يرسم" هذه الموجات على شاشة

أ- لوح كلادنى.

ب- اشكال كلادنى النموذجية .

" فلوريسية " متألقة و يمكن اتمام التصوير الفوتوغرافى المباشر لأشكال الموجة بوساطة آلة تصوير مركزة على شاشة الاسيلوسكوب . ويبين (شكل ٢٠) صورة الشكل الموجى لنغمة موسيقية .

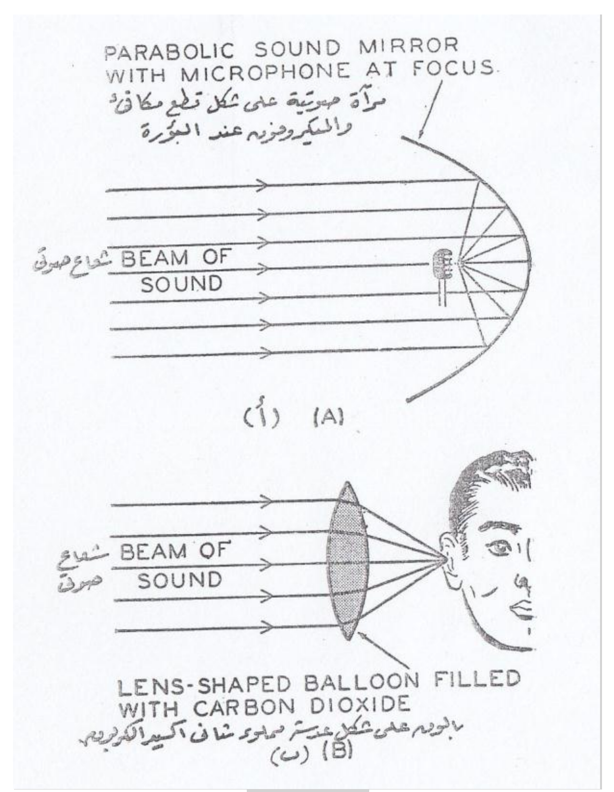


(شكل ٢٠) الشكل الموجى لنغمة موسيقية
(معامل الن . ب . ديمونت و شركاؤه)

٧) "هندسة" الصوت، الصوتيات المعمارية :

عند وصول الصوت الى الحد الفاصل بين وسطين مختلفين ، فانه قد ينعكس أو ينتقل أو يتم امتصاصه . لذلك فان الأصوات قد تنعكس من جوانب الصخور ، أو اطراف الغابات ، أو الجبال الجليدية البعيدة ، أو " المرايا " الصوتية المنحنية المستخدمة بالمعمل . و اذا أخذنا لوحاً مصقولاً من المعدن منحنيا على شكل كرة أو قطع مكافىء ، فانه سيعكس أى شعاع صوتى يصل اليه من مصدر بعيد و يركز طاقة هذا الشعاع فى نقطة تسمى " البؤرة " (Focus) (شكل ٢١ – أ) . واذا أخذنا بالونا على شكل عدسة ، مملوءاً بثانى أكسيد الكربون فانه سوف ينقل و يركز الشعاع الصوتى فى بؤرة (شكل ٢١ – ب) . ونسمى أثر العدسة على مسار موجات الصوت بظاهرة الانكسار (refraction)

(bending) or و يمكن امتصاص الصوات بدرجات متفاوتة بوساطة مواد كاللباد و المطاط و الفلين و ألواح البناء الصوتية Acoustic) Tiles)



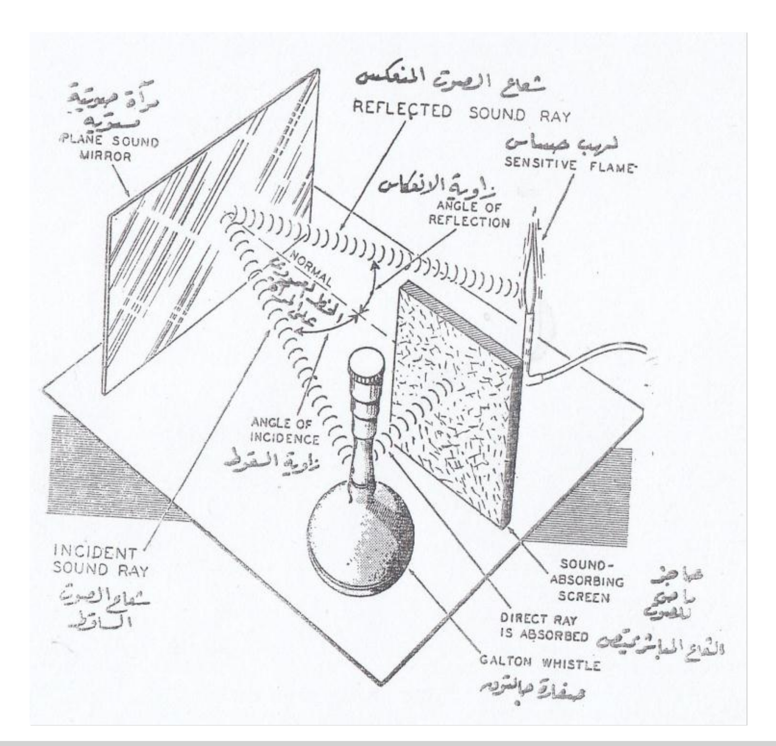
(شكل ٢١)

أ – تركيز الصوت بوساطة عاكس على شكل قطع متكافىء.

ب–تركيز الصوت بوساطة عدسة مملوءة بثانى اكسيد الكربون .

وتستلزم اتجارب الكمية لانعكاس وانكسار الصوت استخدام موجات قصيرة، حيث ان الموجات الاطول تعانى "انحرافا" (diffraction) أى " ثنيا حول الأركان " . و لنفترض أننا

نريد أن نفحص مدى صحة قانون الانعكاس كما ينطبق على الصوت : ينص القانون على أن " زاوية السقوط " (وهى الزاوية بين شعاع الصوت و بين الخط العمودى على " المراذة " الصوتية) تساوى " زاوية الانعكاس " (و هى الزاوية بين شعاع الصوت المنعكس و نفس الخط العمودى) . و نستخدم لاثبات هذا القانون صفارة جالتون التى ترسل نغمة ترددها حوالى ٢٠٠٠٠ ذبذبة/ ث ، و لوحاً معدنياً تام الصقل و " لهبا حساساً " يستخدم ككاشف للصوت المنعكس . و يرتب الجهاز كما فى (شكل ٢٢) .



(شكل ٢٢) قانون إنعكاس الصوت : زاوية السقوط تساوي زاوية الإنعكاس

ويغذى اللهب بغاز مضىء ذى ضغط عال من أنبوبة زجاجية منحرفة . و يضبط منبع الغاز بحيث يكون اللهب على وشك الاضاءة ، أى أنه يكون غير مستقر . و نجد أن اللهب سيهتز بشدة عندما تصطدم به أصوات معينة ذات ترددات عالية كتلك التى انعكست هنا من المرآة . و يلاحظ وضع حاجز (أ) ماص للصوت بين الصفارة و اللهب لمنع الأصوات أو التيارات المباشرة.

و تبين نتائج التجربة أن الاصوات ذات الموجات القصيرة تشبه الى حد بعيد فى سلوكها أشعة الضوء التى تسقط على مرآة ضوئية . وترتد الأصوات من المرايا المعدنية بزاوية سقوط مساوية لزاوية الانعكاس وتنتج الأصداء المتعددة Multiple echos أو الترديدات (reverberations) عندما يكون وضع مصدر الصوت واقعا بين سطحين متوازيين عاكسين للصوت ، تماما مثلما يمكن الحصول على صور متعددة (Multiple images) عندما يكون وضع مصدر الضوء واقعا بين مرآتين مستويتين متوازيتين . و يتسبب فى حدوث قعقعة الرعد الانعكاسات المتكررة للدوى الأصلى بين الأرض و السحب أو بين السحب المتجاورة و بعضها البعض . و الضجيج العالى للسيارات التى تعبر نفقاً مثل نفق لنكولن بنيويورك سببه الانعكاسات المتعددة من حوائط النفق .

و تحدث انعاكسات الصوت من السطوح المنحنية أحيانا أثرا غريبا يعرف باسم أثر " رواق الهمس " (Whispering Gallery) و

تتركز الانعكاسات ، حتى بالنسبة للأصوات الخافتة الصادرة من نقطة فى بناء له قبة عالية (مثل مبنى الكابيتول الأمريكى ، و كنيسة سانت بول) عند نقطة أخرى فى البناء (و قد تكون بعيدة أحيانا) .

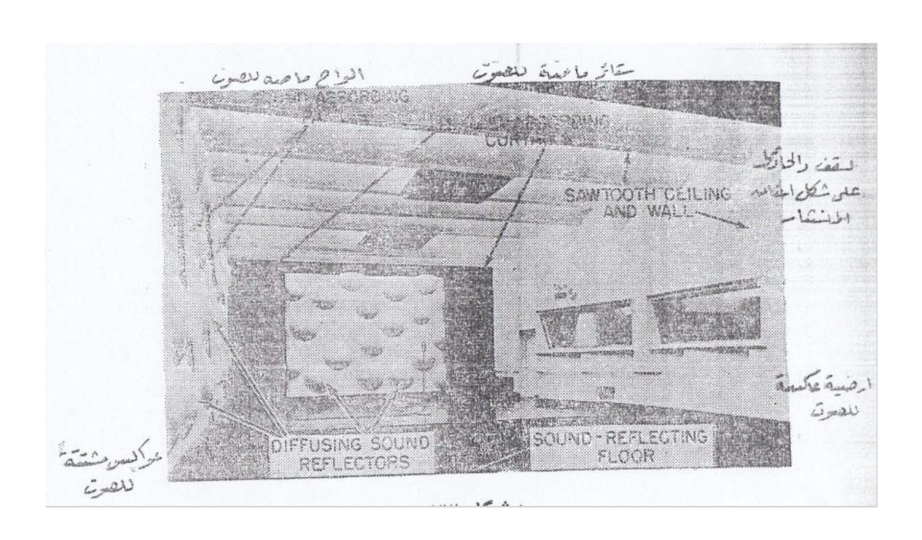
و هكذا ، يكون هناك وضوحية (Intelligibility) تامة ، عندما يكون المتحدث عند النقطة الاولى و يكون السامع عند النقطة الثانية ، رغم انه لن يسمع أى شيء فى نقطة أخرى .

و يمكن القول فنيا بأن الأصداء هى أصوات منعكسة ، نحس بها بخلاف الصوت المباشر . و يسمع صدى واضح منفصل ، اذا وصل الصوت المنعكس الى الأذن بعد ٠,١ ثانية أو أكثر من حدوث الصوت الأصلى . و يتسبب ذلك فى اختلال الوضوح

و فقدان وضوح الصوت . و حيث ان الصوت ينتقل بسرعة ١١٣٠قدم / ثانية فى درجة حرارة الغرفة ، فانه يقطع مسافة اجمالية للذهاب و الاياب طولها ١١٣٠× ٠,١ أى ١١٣ قدما خلال هذه الفترة من الزمن . و هذا يجعل المسافة الحرجة (ذهابا فقط) تعادل $\frac{١١٣}{٢}$ أى ٥٦,٥ قدما . و من ثم يجب ألا تزيد أقصى مسافة من المتكلم الى الحائط المقابل على ٥٦,٥ قدما ، بالنسبة لغرفة لم يجر لها العلاج الصوتى ، اذا أردنا ان نتجنب الأصداء غير المرغوب فيها .

والقاعات الكبيرة ، مثل الصالات و المسارح و القاعات الموسيقية تتميز صوتيا بزمن الترديد (ز) لكل منها . و هو الزمن اللازم لانخفاض شدة الصوت ، تردده ٥١٢ ذ/ث فى العادة ، الى $\frac{١}{١٠٠٠٠٠٠}$ من قيمته الاصلية. ويعزى بقاء الصوت الأصلى طويلا الى كبر قيمة زمن الرديدات، مما يسبب تداخل الصوات المتتابعة واخفاء أو تكدير مركبات الكلام الواضحة ، وهى عادة ذات التردد العالى . واذا كان (زمن الرديد) صغيراً جداً، وجب على المتحدث أن يرفع شدة صوته للتغلب على أثر القاعة الصماء (dead) الذى يظهر حينئذ . وزمن الترديد ١ ثانية هو الزمن الصحيح لموسيقى البيانو المعروفة فى صالة صغيرة للموسيقى ، و ٢,٥ ثانية هو الحد الأقصى الأحسن ملاءمة للمسارح الكبيرة . و فى كثير من الحالات يكون تصحيح الصوتيات بقدر مناسب مفيدا ، و يتم تحقيقه باستخدام المواد المناسبة الماصة للصوت . و يبين (شكل ٢٣) كيف يمكن اتمام ذلك فى استوديو الاذاعة ، حيث توضع المواد المصححة فى أماكن و زوايا معينة فقط بالنسبة لمصدر الصوت .

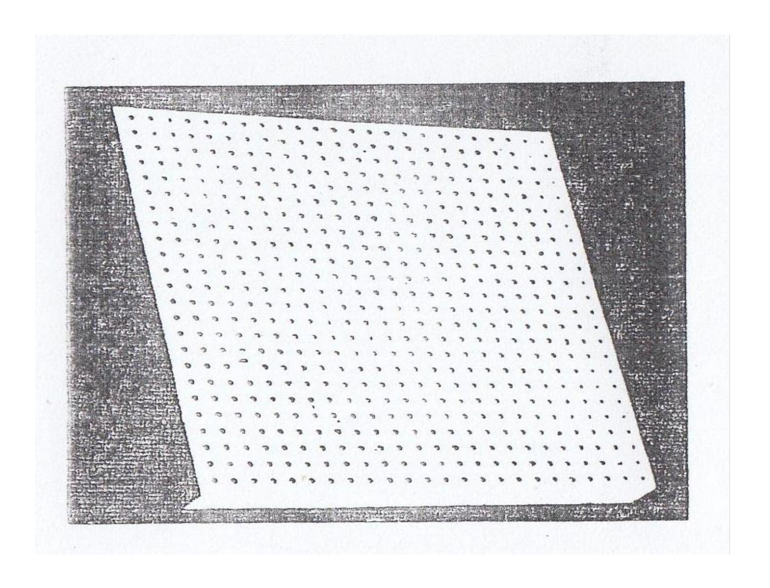
وللمواد الماصة للصوت "معاملات امتصاص" عالية *absorption* *cofficients*) وتعريف معامل الامتصاص هو أنه



(شكل ٢٣) علاج الصوتيات فى استوديو ا اذاعى ، حيث تهيىء الأسطح المشكلة تشكيلاً خاصاً أثر القاعة الحية ، و يقل أثر الاصداء القوية الى أدنى حد لعدم توازى السطح و يمكن التحكم فى زمن الترديد على المسرح بوساطة فتح و غلق الستائر . و أسطح السقف و الحائط على شكل أسنان المنشار منها أسطح ماصة للصوت تواجه المسرح و أخرى فى اتجاه مضاد . و الحائط القريب (غير ظاهر فى الصورة) ماص للصوت . (شركة جونزمانفيل)

الكسر أو النسبة من شدة الصوت الاصلى التى يتم امتصاصها بوساطة المادة المعنية عند تردد محدد . و هكذا فمعامل الامتصاص للسجاد ٠,٢٥ و لشعر اللباد ٠,٤ و للسلوتكس (*celotex*) ٠,٦ و تتباين هذه الأرقام بوضوح اذا قورنت بالمعاملات : ٠,٣ للجبس الناعم ، ٠,٦ للجبس الخشن ، ٠,١ للالواح الخشبية . و يبين (شكل ٢٤) مادة ماصة للصوت تعرف باسم " ألواح الصوتيات المثقوبة " *acoustical transite* و يعتبر الشباك المفتوح معياراً لوحدة الامتصاص – أى يكون

معامل الامتصاص (١) – اذ لا يمكن حدوث أى انعكاس من هذه المساحة .



(شكل ٢٤) (االترانسايت) الواح الصوتيات المثقوبة و هى ماصة أو عازلة للصوت (جونز مانفيل)

أسئلة ومسائل عن الباب الاول

١- ارسم موجة " صوت " طولية رسما تصويرياً بقدر الامكان . وبين فى الرسم مناطق اتضاغط و التخلخل .

٢- يمكن تمثيل الاهتزاز الطولى البسيط بموجة جيبية . اثبت هذه العملية .

٣- ما هو الاصطلاح ذو الصفات الفيزيائية البحتة من بين كل زوج من المصطلحات الاتية :

(أ) الدرجة و التردد . (ب) العلو و الشدة . (ج) النوع والشكل الخارجى ؟

٤- أيهما ينتقل فى اتجاه الأذن عند انتشار الصوت : الوسط أم الطاقة ؟ . اشرح ذلك .

٥- تهتز شوكة رنانة ٢٥٦ اهتزازا فى الثانية الواحدة . ما هى المدة الزمنية لكل اهتزاز ؟

٦- صف حركة ساق الشوكة الرنانة المهتزة .

٧- ارسم موجتين جيبيتين ، احداهما تمثل صوتا عالى التردد والأخرى تمثل صوتا منخفض التردد . افترض أن كلا من الاهتزازين له نفس الاتساع .

٨- لماذا يكون من لخطأ القول بأن درجة الصوت تتغير تغيراً طرديا مع التردد ؟

٩- هل من الصواب أن نتساءل عما اذا كانت شدة الصوت تتغير مع الاتساع ؟ و فى هذه الحالة كيف يحدث هذا التغير ؟

١٠- ما هى سرعة انتقال الصوت فى الهواء عند (-١٠) درجة مئوية و عند (١٠) درجة مئوية ؟

١١- ما هو الاسم الذى يطلق على المسافة التى يقطعها الصوت فى دورة اهتزازية كاملة لجسم محدث للصوت ؟

١٢- تهتز شوكة رنانة س ذبذبة/ ث . ما هو طول موجة الصوت الذى تحدثه الشوكة اذا كانت درجة حرارة الهواء ٥ درجات مئوية ؟

١٣- ما هو تردد النغمة الناتجة عند وضع بطاقة أمام أسنان منشار دائرى يدور بسرعة ١٢٠٠ لفة فى الدقيقة ، عدد أسنانه ١٠٠ ، منتظمة التباعد حول محيطه ؟

١٤- ما هو تردد النغمة الناتجة عن توجيه نفخة من الهواء أمام قرص صفارة (سارينة) له ٨٠ ثقبا متساوية التباعد ، و يدور بسرعة ١٥٠٠ لفة فى الدقيقة ؟ . هل تنطبق اجابتك على درجة الصوت الناتج؟

١٥- بلورة معينة من الكوارتز سريعة التذبذب تنتج فى الهواء اهتزازات فوق السمعية ترددها ١و١ مجاسيكل فى الثانية الواحدة (مجا = مليون) ، فاذا افترضنا أن سرعة الموجة فى الهواء ١١٠٠ قدم فى الثانية الواحدة ، فما هو طول الموجة ، المناظر للاهتزاز ؟

١٦- يضبط رجل ساعته على صفارة على بعد ٢ ميل . فاذا كانت درجة حرارة الهواء ٢٠درجة مئوية ، فكم يكون الخطا فى ساعته ؟ و هل ستؤخر الساعة أم تقدم ؟

١٧- تمر ست ثوان بين صدور صوت صفارة باخرة قاطعة للجليد و بين عودة الصدى من جبل جليدى بعيد . فاذا كانت درجة الحرارة (-٥) درجه مئوية ، فما هو بعد الجبل الجليدى عن الباخرة ؟

١٨- اذا فرضنا أن سرعة الصوت فى الماء الملح هى ٤٨٠٠ قدم فى الثانية ، احسب عمق البحر فى حالة وصول نبضة النبضة الاصلية .

١٩- تتناسب شدة الوت عكسيا مع مربع المسافة من المصدر . قارن الشدة على بعد ١٠ أقدام مع الشدة على بعد ٣٠ قدما من المصدر ، مستخدما هذا القانون .

٢٠- تحدث شوكة رنانة ٣٨٤ اهتزازا فى الثانية الواحدة فى جو من الهيدروجين . ما هو طول الموجة التى تحدثها الشوكة ، اذا فرضنا أن سرعة الصوت فى الهيدروجين هى ٤١٦٥ قدما فى الثانية الواحدة ؟

٢١- سرعة الصوت فى الالمونيوم هى ١٦٧٤٠ قدما فى الثانية الواحدة . فاذا أحدثت اهتزازات طولية ترددها ٤٠٠ ذبذبة/ث فى قضيب من الالمونيوم ، فما هو طول الموجات الناتجة ؟

٢٢- اذا كان تردد أبسط اهتزاز يمكن لوتر موسيقى أن يحدثه هو ٢٠٠ س/ ث ، فما هو تردد التوافق الثانى) و التوافق الثالث ؟

٢٣- ما هو التوافق المتسبب فى حدوث النغمة التوافقية الثالثة *overtone* ؟

٢٤- ارسم وتراً مهتزاً مثبتاً من طرفيه محدثا عقدة اضافية منتصفه ، مع افتراض أن الوتر مضاء بضوء ثابت . ما هو التوافق الحادث ؟ و ما هى النغمة التوافقية المسموعة ؟

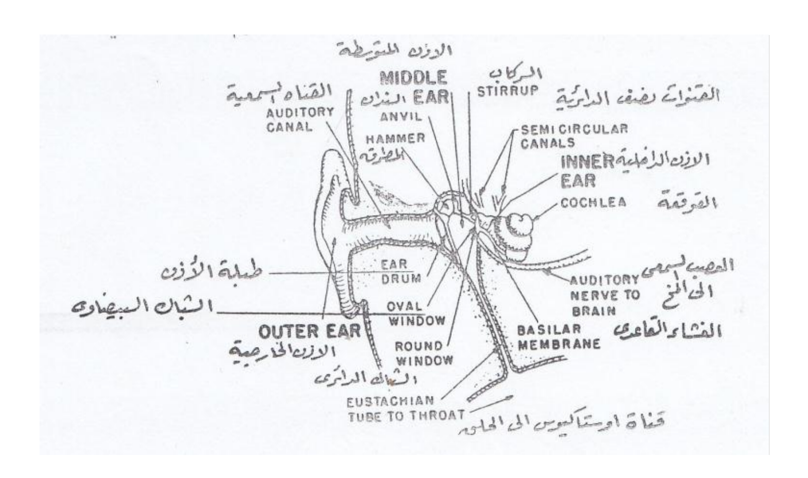
الباب الثانى

السماع والكلام والموسيقى

١) الأذن :

الاذن هي أداة استقبال حساسة للصوت تستجيب للموجات المتضاغطة على مدى واسع للترددات ، والشدة ، والاشكال الموجية، وهي في جوهرها نظام ميكانيكي كهربائي يترجم نبضات الضغط الى تيارات كهربائية دقيقة ، تشبه الى حد ما البلورة الضغطيكهربائية *piezo* *(–electric)* ، التى تولد قوة دفع كهربائية عند ضغطها أو اطالتها . وتنتقل التيارات، الناتجة فى العصب السمعى ، الى المخ الذى يعتبر فى التحليل النهائى، المركز أو المستودع لجميع الاحساسات السمعية .

و(الشكل ٢٥) هو مقطع مبسط للأذن و تقوم القناة السمعية



(الشكل ٢٥) قطاع في الأذن البشرية

–و طولها حوالى ٢٥ مم – بتوصيل الاهتزازات الطولية من الاذن الخارجية الى الاذن المتوسطة . و تنتهى القناة بغشاء رقيق مرن متين سمكه حوالى ٠,١ مم ، و يسمى طبلة الأذن . و تنقل اهتزازات الطبلة الى مجموعة مكونة من ثلاث عظام صغيرة (أو عظيمات) ، ثم يتم تمريرها الى الشباك البيضاوى (حوالى $\frac{١}{٢٠}$ من مساحة الطبلة) ، و تنتقل فى النهاية الى السائل القوقعى *cochlear fluid* الذى يملا الأذن الداخلية (أى الأذن الباطنة) . و هذا هو المسار الذى تتخذه موجات الصوت فى سبيل السماع العادى أو غير المعيب . و فى حالة صمم الأذن المتوسطة تنسد قنوات الصوت العادية ، و ينتقل الصوت بالتوصيل عن طريق العظام *bone conduction* بدلا منها .

ومن الطريف أن نلاحظ أن العظيمات الثلاث تحدث فائدة ميكانيكة أى تزايدا للقوة الى ثلاثى أمثالها .و يوجد معامل تزايد اضافى للضغط الى ٢٠ مثلا يحدث نتيجة تغير حجم الغشاء الرقيق فى نهاية سلسلة العظيمات . و هكذا نحصل على فائدة ميكانيكية كلية تعادل ٦٠ مرة . وتحتوى الأذن الداخلية المليئة بالسائل على القوقعة *cochlea* و هى على شكل قوقعة صغيرة ، ملفوفة حلزونياً حوالى $٢\frac{٣}{٤}$ لفة . و يكون طول القوقعة اذا فككنا لفاتها ٣٥ مم و تنقسم طوليا الى قناتين ، يفصلهما الغشاء القاعدى *basilar Membrane* و هو مبطن بوساطة ٢٥,٠٠٠ خلية شعرية أو أطراف عصبية لعضو كورتى *organ of corti*

. و يغذى الخرج المتعادل لهذا العضو الى العصب السمعى مباشرة . و لا تدخل القنوات نصف الدائرية فى عملية السمع ، و لكنها تزودنا بحاسة التوازن .

٢) الادراك الحسى لدرجة الصوت :-

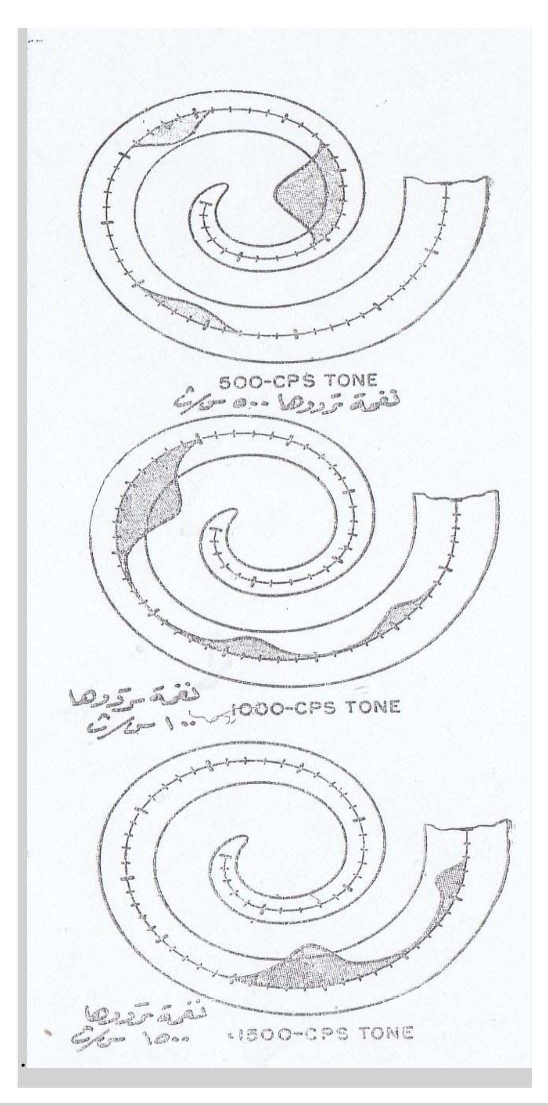
يلزم وجود فترة زمنية معينة – حوالى $\frac{١}{٥٠}$ من الثانية عادة – لادراك الاحساس بالدرجة .و اقل تردد مسموع هو حوالى ٢٠ذبذبة / ث ، أما النغمات الاقل ترددا فاننا نحس بها كنبضات غير

مستمرة . و معدل الاهتزازات التى تزيد على ٢٠,٠٠٠ ذبذبة / لا تسبب ادراكا حسيا بالدرجة ، و لذلك نقول ان الاذن لا تحس بها . والأذن أكثر حساسية للتغيرات فى الشدة ، و تستطيع الاذن المدربة تمييز تغيرات التردد الصغيرة التى تصل الى ٢ ذبذبة / ث فى نطاقات معينة للمدى . و تفقد الأذن قدرتها على تمييز الدرجة بالقرب من الحد الأعلى و الحد الأدنى للسماع . و تمتد الاستجابة للصوتيات عند الكلاب الى ٤٠,٠٠٠ ذبذبة /ث ، كما أن الخفاش حساس " للأصوات " أو بمعنى أصح للاهتزازات فوق السمعية التى ترددها ٥٠,٠٠٠ ذبذبة / ث .

و تدل التجارب التى أجريت فى معامل " بل " للتليفونات على أن ازالة التردد الاساسى من موجة صوتية مركبة (و يتم ذلك باستخدام

مرشحات كهربائية) ، لا تغير من الاحساس بالدرجة ، و هناك حقيقة عجيبة و هى ان الدرجة الظاهرية تتأثر جوهرياً بشدة الصوت عند الترددات السمعية المنخفضة جدا و العالية جدا . و سنأخذ هذه النقطة فى الاعتبار بشىء من التفصيل عندما نناقش مسألة الشدة ، و نظيرها السيكولوجى العلو . و سيتبين حينئذ أن الاحساس بالعلو يتأثر أيضا بتردد النغمة . و كل ما يمكن تأكيده الآن هو أن أى زيادة فى التردد يصاحبها زيادة فى الدرجة ، فى الجزء الأوسط من الطيف السمعى . وبالطبع ، لا يمكن القول بأية حال ان الدرجة تتناسب حسابياً مع التردد.

و من المعتقد أن الاجزاء المختلفة من الغشاء القاعدى تستجيب انتقائياً للنغمات المختلفة التردد . و يبين (شكل ٢٦) مجموعة من ثلاثة نماذج لاستجابة القوقعة لنغمات لها نفس الشدة ، مرسومة طبقا لهذه النظرية . و هناك " زحزحة " عامة لمنطقة أقصى تنبه للعصب نحو الطرف المفتوح من القوقعة ، كلما ارتفعت قيمة تردد الصوت المصطدم



(شكل ٢٦) نماذج لاستجابة القوقعة لثلاث نغمات مختلفة في التردد ولكن لها نفس الشدة

٣) الادراك الحسى لعلو الصوت :ـ

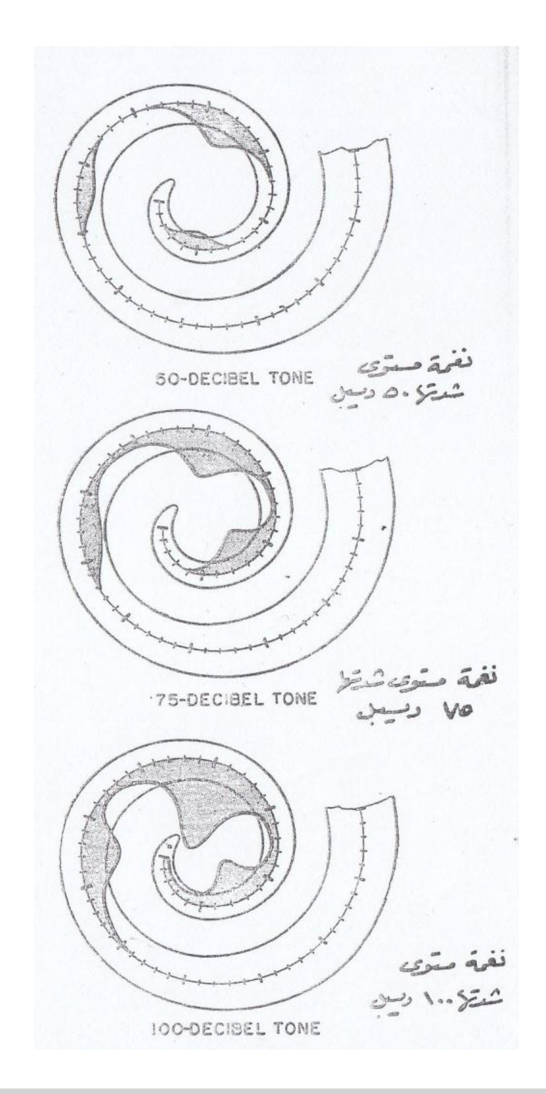
و كما أن التردد كمية فيزيائية يمكن قياسها ، بينما الدرجة – و هى

نظيره الشخصى الذى يعتذر بعض الشيء تحديده – فان الشدة كمية فيزيائية يمكن قياسها ، بينما العلو احساس سيكولوجى بحت و من ثم لا يمكن قياسه . و لقد عرفنا من قبل الشدة بأنها معدل انسياب طاقة الصوتيات لكل وحدة مساحة معترضة و عبرنا عنها بالوات لكل سم٢ (الباب الاول) . و تستجيب الأذن العادية اللأصوات ذات شدة صغيرة تصل الى $١٠^{-١٦}$ وات / سم٢ عند تردد قياسى قيمته ١٠٠٠ ذبذبة /ث بل أنها تستجيب حتى بالنسة للاصوات اكثر خفوتا ترددها بين ٢٠٠٠ و ٣٠٠٠ ذبذبة /ث (و هو المدى الذى تمارس فيه أقصى حساسيتها) . و أعلى صوت يمكن للأذن احتماله يمثل شدة قيمتها $١٠^{-٤}$ وات / سم٢ . و غذا اتفقنا على أن مدى الترددات التى يمكن تمييزها هو مدى عريض (٢٠الى ٢٠,٠٠٠) ، فيجب أن نسلم بأن مدى الشدة الذى تمارس الأذن فيه و ظيفتها ($١٠^{-١٦}$ الى $١٠^{-٤}$ أى كنسبة ١ : $١٠^{١٢}$) يسترعى الانتباه كذلك بدرجة اكبر .

و لنر ماذا يحدث فى الأذن عندما ترتفع شدة الصوت بينما يبقى التردد ثابتاً . فبالرجوع الى (شكل ٢٧) نلاحظ أن منطقة أقصى تنبيه حسى لم تعد تتزحزح فى اتجاه طول الغشاء القاعدى . و لكن مقدار (أو قيمة) هذا التنبيه الحسى يزداد مع الشدة . و يمكننا القول بأنه كلما زادت شدة الصوت ازداد الاحساس بالعدو .

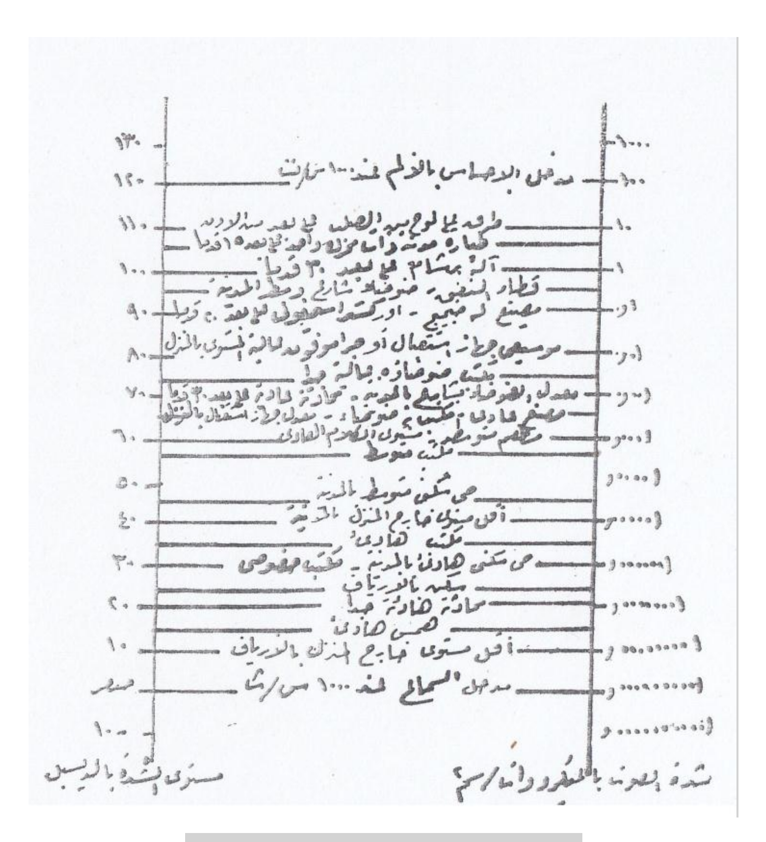
و يسبب امتداد منطقة الاستجابة نحو الطرف الخارجى للقوقعة تغيراً ظاهرياً فى الدرجة كلما ازداد علو الصوت .

و فى الحقيقة لا يمكن تنظيم مقياس للعلو . و على كل حال ، فمن الممكن بسهولة عمل مقياس نسبى أساسه لو غاريتم النسبة بين شدتين . و يعتمد مثل هذا القياس ، الذى يعرف بمقياس



(شكل ٢٧) نماذج لاستجابة القوقعة لنغمة ثابتة التردد عند ثلاث مستويات مختلفة في الشدة

(مستويات الشدة) *(Intensity Levels)* على قانون فيبر فشنر *(weber –fechner)*   الذى ينص على أن الاستجابة تتغير مع لوغاريتم العامل المنبه للاحساس .



(شكل ٢٨)   مستويات شدة الصوت

و(شكل ٢٨) هو مقياس لمستويات الشدة يمتد من صفر ديسيبل لأضعف الاصوات التى يمكن ادراكها ، الى ١٢٠ ديسيبل وهو صوت

القصف الشديد للرعد . وحديثاً ، تم تقدير مستوى شدة ضجيج محرك طائة نفاثة تعمل فى غرفة اختبار ، بمقدار ١٦٠ ديسيبل. ويحتوى الرسم كذلك على مقياس للطاقات النسبية للصون . ويبين (شكل ٢٩) جهاز قياس مستوى الصوت، وهو مصمم لقياس الضوضاء فى الأماكن التجارية والصناعية. ويتكون الجهاز من ميكرفون دائرى الخواص (الاتجاهى)، ومقو الكترونى ومبين للقياس.



(شكل ٢٩) جهاز قياس مستوي الصوت

ولقد ذكرنا من قبل حقيقة أن التغيرات فى الشدة تؤثر على الاحساس بالدرجة ، رغم ما يبدو ظاهرياً من عدم ارتباطه بها . وهكذا ، فبالنسبة للترددات التى تقل عن ٢٠٠٠ ذبذبة /ث ، فان ازدياد الشدة لصوت ثابت التردد يجعل الدرجة تبدو كما لو كانت ترتفع . و الأثر عكسي بالنسبة للترددات التى تزيد على ٢٠٠٠ذبذبة / ث . و عند

التردد ١٠٠٠ ذبذبة /ث لا يبدو اى تغيير فى الدرجة مع التغيرات فى الشدة . و الاستجابة الافتراضية لقوقعة الاذن (الواضحة فى النماذج السمعية فى شكل (٢٦ و ٢٧) تأخذ هذا فى الاعتبار . و ان نظام التوصيل العصبى هو الذى يوضح لنا لماذا تتداخل اساسات الدرجة و العلو بينما تبقى نظائها الفيزيائية – التردد و الشدة – واضحة و مستقلة كل منها عن الآخر ؟

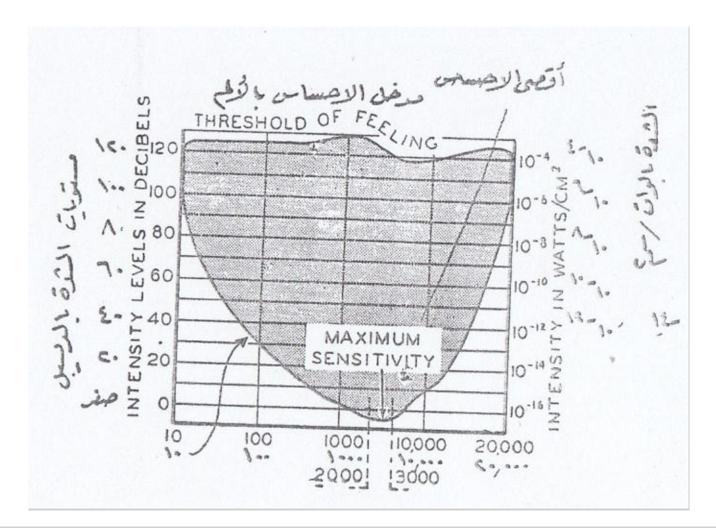
(*) لوغاريتم عدد ما هو القوة أو الأس الذى يجب أن يرفع الية الاساس ١٠ لانتاج العدد المطلوب : و هكذا فان لوغاريتم ١٠٠ هو ٢ ، حيث ان ٢١٠ = ١٠٠ . و لوغاريتم ١٠٠٠ هو ٣ ، و لوغاريتم ١٠,٠٠٠,٠٠٠ : ١ ، فيمكن القول بأن مستوى شدة الصوت الأعلى (و هو قياس لعلوه) هو ٧ بل (ب) أو ٧٠ ديسيبل (دب) فوق مستوى شدة النغمة المرجعية . (ديسيبل واحد ، هو أقل تغيير فى العلو يمكن تمييزه) . هل يمكنك حساب مستوى شدة صوت معدل فى العلو يمكن تمييزه) . هل يمكنك حساب مستوى شدة صوت معدل انسياب طاقته ١٠–١٠ وات / سم٢ ؟ و اخر شدته ١٠–١٢وات / سم٢؟

ويعمل العصب السمعى على أساس "اما الكل واما لا شيء". وطبقا لذلك فانه يحتاج الى تنبيه لا يقل عن حد أدنى معين ليسبب "انطلاق" الاحساس، ولا أثر لنبضه أقوى على سرعة انطلاق الاحساس. وعلى كل حال فالاصوات ذات الشدة الاكبر تسبب استجابة عدد أكبر من الألياف العصبية ، أو بمعنى أخر، تحدث زحزحة فى مكان استجابة

القوقعة ، الذى يرتبط عادة بتغيرات التردد. وهذا يسبب تغير الاحساس بالدرجة و كذلك العلو .

وبالمثل، فان تغيرات التردد تسبب تغيرات فى العلو، حيث ان زحزحة مكان مناطق أقصى استجابة على طول الغشاء القاعدى تجعل الألياف العصبية المجاورة تلعب دورها فى اظهار استجابات مختلفة للشدة.

وتتضح العلاقة المتبادلة بين الدرجة و العلو فى رسم المنطقة السمعية (شكل ٣٠) .



(شكل ٣٠) المنطقة السمعية بين أقل مستوى (مدخل السماع) وأقصى مستوى (مدخل الاحساس بالالم)

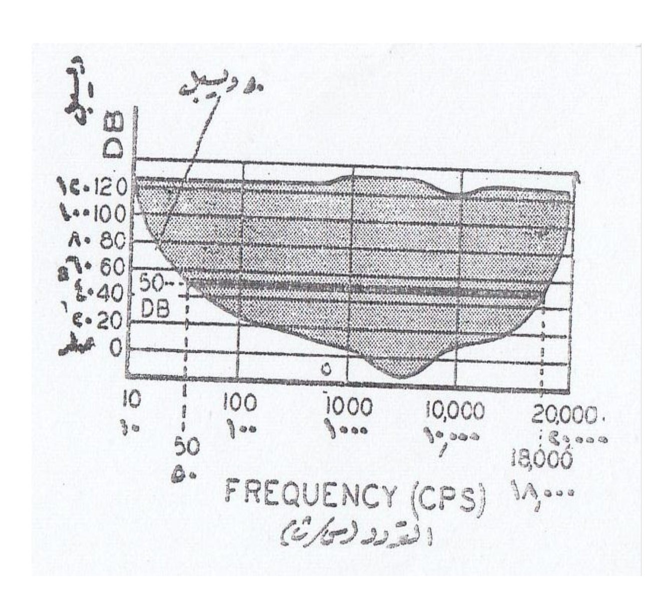
والرسم يبين ما يمكن تسميته باسم المنطقة الفعالة للسماع ويحدها منحيان: المنحنى الأسفل ويمثل مستوى بدء السماع (مدخل

السماع) (*Threshold of hearing*)، والمنحنى الأعلى ويمثل مستوى بدء الاحساس بالالم (مدخل الاحساس) (*THRESHOLD OF FEELING*) وكل منحن مرسوم فيه مستويات الشدة بالديسبل (دب) كاحداثيات رأسية ، والترددات ذبذبة فى الثانية (س/ث) كاحداثيات أفقية . ومن المناسب أن ترسم الترددات على مقياس لوغاريتمى ، و نظرا لأن الشدة تبين بوحدات الديسيبل ، فهى كذلك ترسم على مقياس لوغاريتمى . ومن المسلم به أن المنطقة السمعية المشمولة بين المنحنين تختص بشخص حاسته السمعية جيدة .

ويمكن استنباط عدد من الحقائق الهامة من الشكل . فيلاحظ أولا أن الاذن أشد حساسية للترددات بين ٢٠٠٠ س / ث ، ٣٠٠٠ س/ث (فهى فى الواقع تستجيب للأصوات ذات قيم " سالبة " بالديسبل فى هذا النطاق) .و عند الترددات المنخفضة يرتفع مستوى مدخل السماع بحدة لدرجة أنه يلزم وجود شدة قيمتها ٣٠ ديسيبل كحد أدنى عند تردد ١٠٠س/ث حتى يمكن مجرد ادراك سماع الصوت . وفوق التردد ٣٠٠٠ س/ث يرتفع مستوى مدخل السماع مرة أخرى، لدرجة أنه عند الحد الأعلى للترددات السمعية – ٢٠,٠٠٠ س/ث – نجد أن المستوى المطلوب كحد أدنى للسماع – و هو ١٢٠ ديسيبل – هو نفس المستوى الذى يحدث اللم .

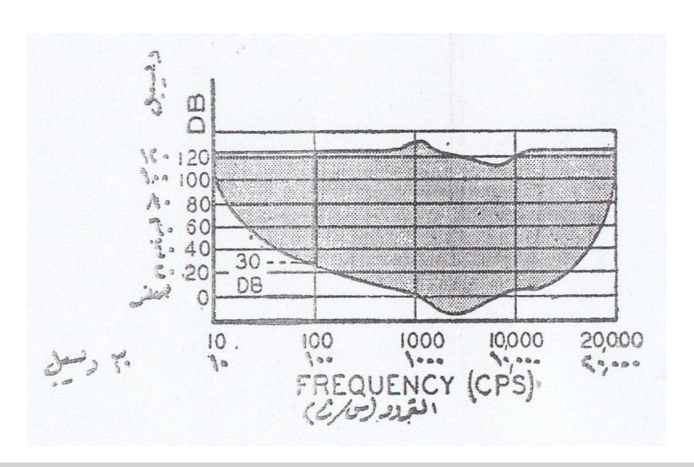
ومع ذلك فان الشكل يبين لنا نواحى أخرى . فاننا نرى أن مستوى الشدة يحدد فى الواقع مدى السماع . و هكذا فانه يمكن سماع نغمة مستوى شدتها مثبت عند ٥٠ ديسيبل اذا وقع التردد بين ٥٠ س/ث ،

١٨,٠٠٠ س/ث (شكل ٣١) . و بالعكس ، فاذا ثبتنا التردد عند ١٠٠ س/ث مثلا ، فان مدى مستويات الشدة .



(شكل ٣١) تأثير المستوى الثابت للشدة على مدى الترددات السمعية يلاحظ أنه عند مستوى الشدة ٥٠ ديسيبل تستجيب الاذن للترادادات الواقعة بين ٥٠ = ١٨,٠٠٠ س/ث

التى تستجيب لها الاذن هو من ٣٠ ديسيبل الى ١٢٠ ديسيبل، كما أنه يمتد من ٢٠ ديسيبل الى ١٢٠ عند التردد ٢٠٠ س / ث (شكل ٣٢) .



(شكل ٣٢) تأثير التردد الثابت على مدى مستويات الشدة المسموعة
يلاحظ أنه عند تردد ١٠٠ س / ث تستجيب الأذن لمستويات الشدة بين ٣٠ – ١٢٠ ديسيبل

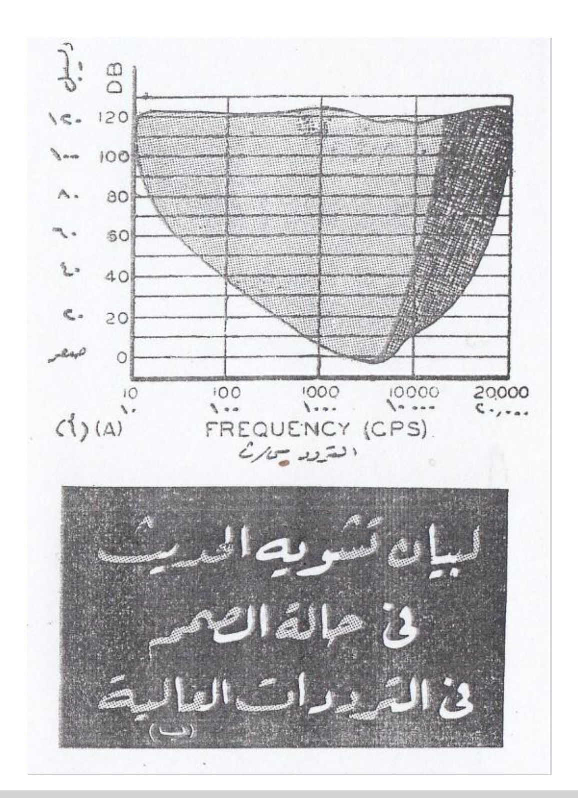
٤) الإدراك الحسى لنوع الصوت :

وبقى أن نعرف الاحساس بنوع الصوت (*quality*)، الذى يناظره فيزيائيا طريقة الاهتزاز أو الشكل الموجى (*Waveform*) فى الصوت وفى غالبية الأحوال، تتحدد درجة أى صوت مركب بالتردد الأساسى، رغم أن وجود التردد الأساسى نفسه ليس ضرورياً . وعلى كل حال، فان وجود النغمات التوافقية يجعل تمييز درجة الصوت أكثر سهولة .

٥) عيوب السماع و تصحيحها :

اذا كان ضعف السماع ناتجا عن وجود حالة غير عادية أو عائق فى الأذن الوسطى ، فاننا نصف ذلك بصمم التوصيل ، أما اذا كان بسبب عيب فى العصب السمعى فانه يصمم العصب .

وتقدر نسبة المصابين بعيوب فى السماع بخمسة الى عشرة فى المائة من مجموع السكان . ويبين (شكل **٣٣** أ) اوديوجرام *Audiogram*) (أو منحنى المنطقة السمعية لشخص ضعيف السمع عند الترددات العالية .



(شكل **٣٣**) (أ) منحنى للمنطقة السمعية يمثل فيه الجزء المظلل السماع فى مدى الترددات العالية . و الشخص الذى ينطبق عليه هذا المنحنى يفتقد أصوات الحروف المظللة فى (ب)

وفى حالة مثل الفقد السمعى فى مدى الترددات العالية، تسمع الحروف المتحركة ذات الترددات المنخفضة فى الجملة المبينة بسهولة،

بينما يتعذر تمييز الأصوات المناظرة للحروف الساكنة ذات الترددات العالية. وتكون النتيجة ضعف الوضوح ، الذى يمكن تصحيحه باستخدام أداة سماع تستجيب لمركبات الترددات العالية . وكلما تقدم السن يلاحظ فقد عام فى الحساسية لهذه المركبات حتى بالنسبة للأذن "العادية " .

ويستخدم (الاوديوميتر) (*Audiometer*) (جهاز القياس السمعى) للحصول على البيانات الازمة لرسم الاوديوجرام (منحنى المنطقة السمعية)، لتحديد الفقد فى السماع ، و تشخيص المرض السمعى، الخ والجهاز عبارة عن مذبذب الكترونى يمكنه توليد التيارات الكهربائية المتغيرة عند الترددات السمعية المختلفة ، من ١٢٥ س / ث الى ١٠,٠٠٠ س / ث عادة . ويتم تغير شدة النغمة عند كل تردد يتحدد منسوب مدخل السماع . (و يحدد كذلك مدخل الاحساس اذا أردنا الحصول على أوديوجرام كامل) .

ويستخدم أحيانا اختبار لوضوح الكلام (*speecharticulation*) يعتمد على كلمات تبرز الأصوات ذات الترددات المنخفضة و العالية .

ويجرى هذا الاختبار بالاضافة الى اختبار الاوديوميتر . وهكذا فكلمات مثل زيت، حرير، طوخ، فوج يجب أن تكون واضحة للأشخاص

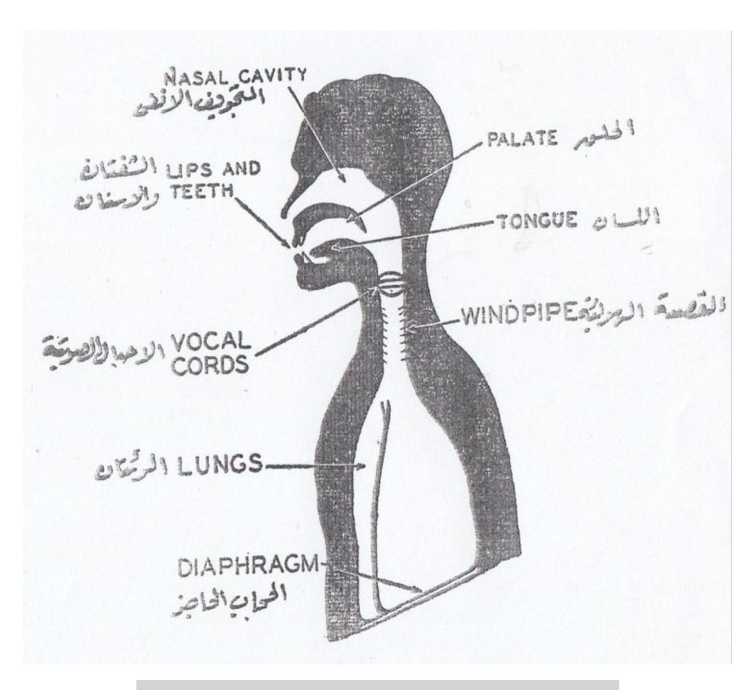
ذوى الحساسية العادية لمركبات الترددات العالية . ويجرى اختبار منفصل لكل من التوصيل بطريق الهواء ، وبطريق العظام .

٦) الصوت البشرى ، و الكلام ، و الاغنية :ـ

يبين (شكل ٣٤) مقطعا فى النظام العضوى المحدث للصوت البشرى . اذ يندفع تيار من الهواء صادر من الرئتين بين الاحبال الصوتية فى الحنجرة . و تنتقل اهتزازات الاحبال الصوتية الى الفجوات الرنانة المكونة من الحنجرة و قاعدة و سقف الحلق . الخ .

كما يتم تدعيمها و تقويتها فى هذه الفجوات الرنانة . ويتم التحكم فى درجة الصوت الناتج بواسطة مفعول العضلات التى تتحكم فى الفتحة بين الأحبال الصوتية ، وكذلك بوساطة توتر الأحبال الصوتية ذاتها ويعتمد علو الصوت على القوة التى يندفع بها الهواء موجها الى الأحبال الصوتية .ويتحدد الصوت بالاثر الرنان للفجوات الهوائية المختلفة كتلك التى فى الصدر، والفم، والحلق، والانف، والجيوب الانفية. (وسنعرف مزيدا من المعلومات عن الرنين فى الباب الثالث ، ويكفينا هنا أن نفكر فى الرنين كتدعيم انتقائى لأجزاء محددة فى اموجة الصوتية المركبة).

والطبيق الفنى للغناء ينبنى على الحفاظ على درجة الصوت ثابتةو سليمة لفترات زمنية طويلة مع التحكم الماهر فى الفجوات الرنانة المشتركة فى تكوين و القاء الصوت . و لعل الحصول على نوع النغمة (*Timber*) المقبول هو أحد المطالب ذات الأهمية القصوى .



(شكل ٣٤) النظام العضوى المحدث للصوت

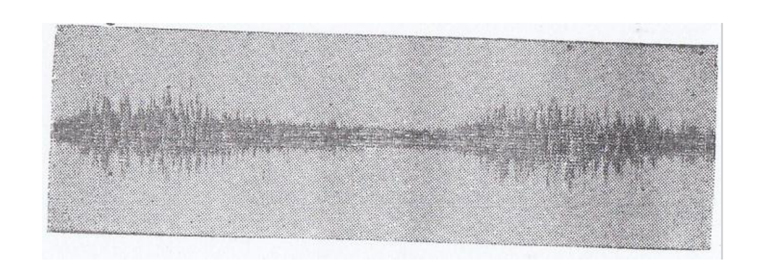
ويزيد مدى الصوت البشرى (من اقل النغمات ترددا و هى الباص *(Bass)* الغنائى، الى اعلاها ترددا وعى السوبرانو *(Soprano)* على اربعة أو كتافات بقليل (*octave*) (الأكتاف اواحد هو الفترة بين نغمتين نسبة ترددهما كنسبة ١:٢) . و يغطى هذا المدى من الترددات الاساسية نطاقا للترددات من ٨٠ الى ١٤٠٠ س/ث و يتسع مدى الاصوات البشرية النادرة بعد هذا النطاق .

و يمكن عمل تصنيف عام لمعظم أصوات الكلام على أساس ما ذا كانت ملفوظة أو غير ملفوظة . فالأصوات الملفوظة تشمل الحروف المتحركة و تحتوى فى غالبيتها على مركبات الترددات المنخفضة (اقل

من ٢٠٠٠ س/ث) . و الاصوات غير الملفوظة تحتوى على الحروف الساكنة و تكون طاقتها بصفة عامة موزعة على الترددات العليا .

و من الصفات المميزة أيضا لهذين الصنفين من أصوات الكلام أن الحروف المتحركة تحمل طاقة تزيد كثيرا على ما تحملها الحروف الساكنة (بعض الحروف الساكنة تحتوى على ما يعادل مئات المرات ما تحتويه طاقة بعض الحروف الساكنة الضعيفة عند نطقها بطريقة طبيعية). و مع ذلك ، فان الحروف الساكنة تلعب دورا هاما فى نقل وضوح الكلام . و فى الحقيقة ، فان حذف الحروف المتحركة أو أن يستبدل بها صوت متعادل ما مثل " اه " لن يفسد الكلام بدرجة كبيرة تمنع نقل كمية مقبولة من وضوح الكلام فى الجملة . و على كل حال ، فان حذف الحروف الساكنة قد يجعل الجمل غير واضحة فعلا .

و كثيرا ما تدرس أصوات الكلام بوساطة رسم الاشارة الكترونيا (الاوسيلوجراف) (*Oscillographs*) مثل المبين (شكل ٣٥) .



(شكل ٣٥) (رسم الكترونى لكلمة اه)

ومن الغريب أن الشدة الفعلية للصوت البشرى ضئيلة جدا، فالمحادثة العادية مثلا تحتاج الى قدرة خرج قدرها $\frac{١}{١٠٠,٠٠٠}$ من الوات فقط . كما أن كفاءة النظام العضوى المحدث للصوت البشرى ضعيفة تماماً ، و قد تبلغ واحدا فى المائة .

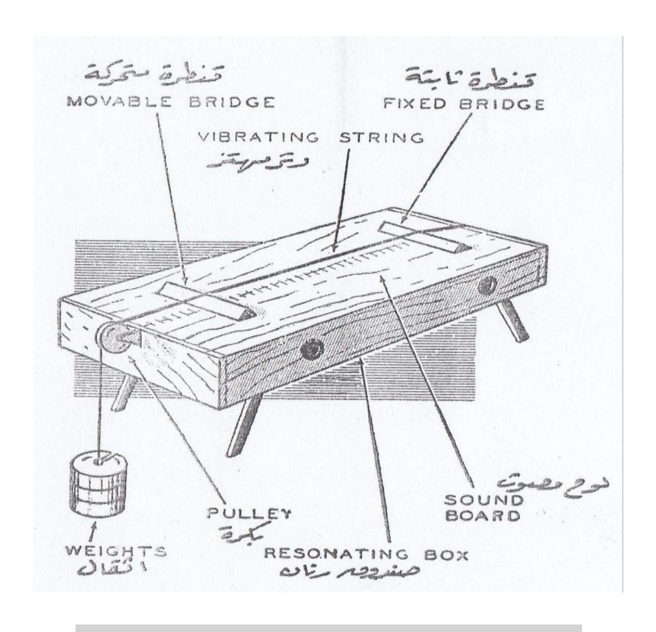
٧) فيزياء الموسيقى :-

يمكن تعريف الموسيقى بأنها احساس مركب مستمد من تتابع مطلوب من الأصوات المختلفة ، أو مزيج منها ، أو منها كليهما معا . وهى حالة شعورية سيكولوجية شخصية بحتة ، فحكمالمستمع هو الفيصل الوحيد لتحديد قيمتها بالنسبة له . وقد تتبع الموسيقى "قواعد" توافقية (هارمونية) معينة ، أو قد تكون متنافرة تماما ، كما يحدث غالباً فى التأليف الموسيقى الحديث .

وتستخدم الآلات الموسيقية أوتارا يمكن امرار قوس عليها ، أو الضرب عليها ، أو جذبها بالاصبع أو الريشة . ومن أمثلة ذلك الكمان و البيانو والجيتار . وتحدث الاصوات الموسيقية أيضا عند اهتزاز الأعمدة الهوائية (*air columns*) (وسنناقش ذلك فى الباب الثالث)، كما فى الفلوت (يشبه الناى)، أو الكالارينيت ، أو الكورنيت، أو الأرغن . وآلات الايقاع مثل الطبلة و الرق تشمل اهتزاز اغشية أو جلود رقيقة مشدودة . ويمكن جعل كثير من الأجسام المهتزة الأخرى تولد الأصوات الموسيقية .

و تكون اهتزازات الأوتار حسب قوانين فيزيائية معينة . و يمكن اثبات قوانين منها بوساطة " صونومتر " ذى وتر واحد (شكل **٣٦**) .

ويتكون الجهاز من سلك من الصلب قطره منتظم، ومشدود باحكام فوق صندوق مصوت طويل، مسارا فوق دعامتين أو "قنطرتين" احداهما ثابتة والاخرى يمكن تحريكها . ويمر الطرف الحر من السلك على بكرة، ويبقى مشدودا بوساطة مجموعة من الاثقال، ويقاس طول الوتر المهتز من القنطرة الثابتة الى القنطرة المتحركة .



(شكل **٣٦**) صونومتر بسيط مكون من وتر واحد

وينص القانون الاول للاوتار الذى اكتشفه فيثاغورث منذ **٢٥٠٠** سنة على أن التردد الأساسى لوتر مهتز يتناسب عكسيا مع طول الوتر . فاذا ضبطنا شد وتر " الصونومتر " بحيث نجعل نغمته الاساسية تمتزج

مع تلك الناتجة عن شوكة قياسية رنانة ترددها ٢٥٦ س / ث مثلا ، فانا نجد أن تقصير طول الوتر الى نصف طوله الاصلى (مع عدم تغيير الشد " ، يسبب امنزاج النغمة الاساسية الجديدة مع النغمة الصادرة من شوكة رنانةترددها ٥١٢ س / ث (و يلاحظ أننا يجب أن نضرب على الوتر أو نمرر عليه قوساً عند منتصفه حتى يمكن انتاج حالة الاهتزاز الاساسى .

فاذا ثبتنا طول الوتر و غيرنا الشد فقط ، فاننا نجد مثلا ان التردد الاساسى سيصل الى الضعف و ان الدرجة سترتفع " اوكتافا " واحدا عند زيادة الشد الى اربعة امثال قيمته الاولى . و نقول ان التردد الاساسى لوتر مهتز يتناسب طردياً مع الجذر التربيعى لشد الوتر . و ينسب هذا القانون الى عالم الرياضيات الفرنسي (ميرسين) *Mersenne*

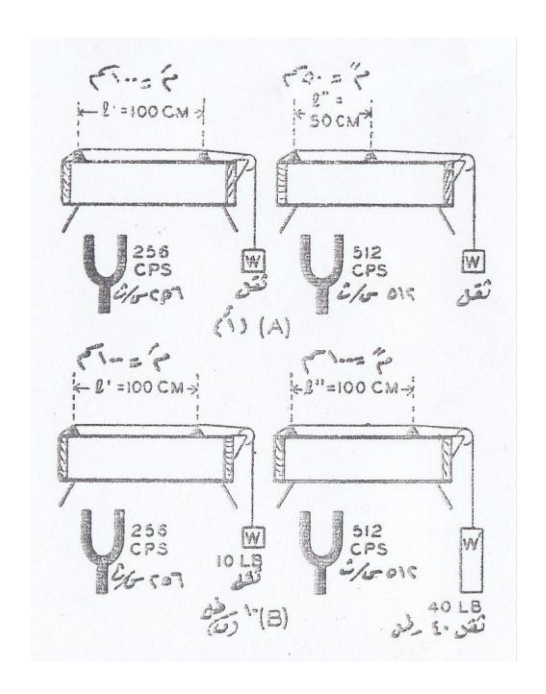
ولإثبات القانون الثالث للأوتار يستخدم "صونومتر" ذو وترين من مادة واحدة مع اختلاف مساحة مقطع كل منهما . فاذا ثبتنا كلا من الطول و الشد ، فاننا نجد أن التردد الاساسى يتناسب عكسياً مع الجذر التربيعى للكتلة لكل وحدة طولية من الوتر .

وهكذا ، فاذا كانت الكتلة لكل وحدة طولية من الوتر السميك تعادل أربعة أمثال الكتلة لكل وحدة طولية من الوتر الرفيع ، فان التردد

الاساسى للوتر السميك يكون $\frac{1}{\sqrt{4}}$ اى $\frac{1}{2}$ التردد الاساسى للوتر الرفيع .
وينسب هذا القانون ايضا الى (ميرسين) .

ويلخص (الشكل ٣٧) القانونين الاول والثانى للأوتار بطريقة مصورة .

ولنبحث الآن كيف تطبق قوانين الأوتار على انتاج الاصوات الموسيقية فى "الشيللو" (شكل ٣٨): فالنغمات منخفضة الدرجة تنتج عن الاوتار السميكة مرتخية الشد . وأوتار الباص ملفوفة لولبيا بأسلاك الفضة (ملفوفة فوق الوتر) . وينتج عن ذلك زيادة الكتلة الطولية للأوتار مما يسبب اهتزازا أكثر بطئاً . (ويفضل استخدام الوتر الملفوف فوقه أسلاك الفضة عن الوتر المكون من سلك واحد سميك القطر ، اذ أنه أكثر مرونة ، ومن ثم فانه ينتج نغمات غنية بالتوافقيات) والاصوات عالية الدرجة تنتج عن الاوتار الرفيعة محكمة الشد . وحيث ان جميع اوتار "الشيللو" لها نفس الطول، مع استخدام اربعة أوتار فقط لانتاج المدى الكامل لنغمات الآلة، فان عازف "الشيللو" يعزف نغمات أعلى من تلك تنغم اليها الاوتار، بأن يضغط عليها ازاء الدستان (لوجه الاصابع) (*Fingerborad*) لتقصير طولها المهتز.

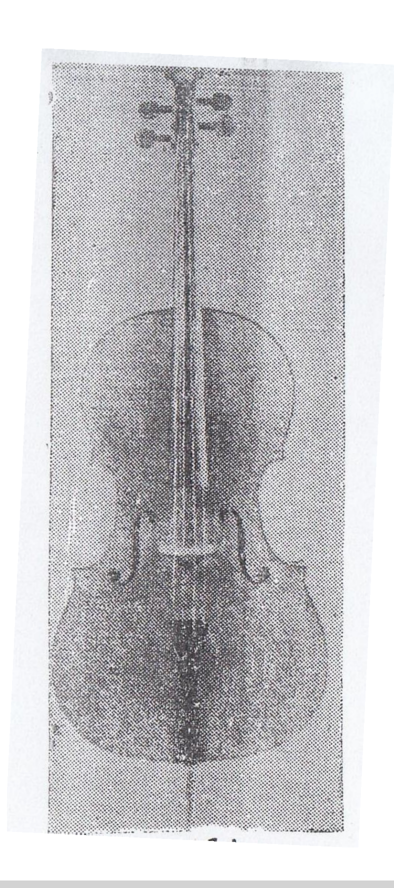


(شكل ٣٧)

(١) العلاقة بين التردد الاساسى للوتر وطول الوتر: ت $\sim \frac{1}{\text{م}}$ (ب) العلاقة بين تردد الوتر وبين شد الوتر : ن $\sim \sqrt{\text{س}}$

و يبين طيف القدرة (*power spectrum*) الألات الموسيقية أن القدر الاكبر من الطاقة ينتقل بوساطة الأصوات ذات الترددات المنخفضة و المتوسطة ، تماماً كما هو الحال فى الصوت البشرى . ولذلك فان طبلة الباص (*Bass Drum*) والطرف منخفض الدرجة من لوحة مفاتيح البيانو تعزى اليها الكميات الكبيرة نسبيا من قدرة الصوتيات .

والشكل ٣٩ يمثل الطيف السمعى للصوت البشرى والآلات الموسيقية المختلفة . و يقارن مدى ترddاتها مع اللوحة القياسية لمفاتيح البيانو .



(شكل ٣٨) الشيللو من نوع دافيدوف صنعها انطوان ستارديفاياس سنة ١٧١٢

أسئلة ومسائل عن الباب الثانى

١- لماذا يستحيل ان الدرجة تتغير طرديا مع التردد ؟ اذكر ما يمكن قوله عن العلاقة بينهما .

٢- اذكر قانون (فيبر فنشر) وضح كيفية تطبيقه لقياس علو الصوت.

٣- ما هو الاسم الخاص بالاهتزازات تحت مدى الترددات السمعية ؟ و فوق المدى ؟

٤- ما هى الاسباب التى تجعل زيادة شدة نغمة ثابتة التردد قد تخفض درجتها الظاهرية ؟

٥- قامت معاملة "بل" للتليفونات بتجارب لترشيح مركبات الترددات المنخفضة والعالية لكل من الكلام و الموسيقى. ما هو الاثر على الوضوح *(clarity)* أو التحديد *(definition)* عند ازالة :

(أ) مركبات الترددات المنخفضة .

(ب) مركبات الترددات العالية .

٦- يكون صوت المرأة عاملة التليفون اكثر وضوحا من صوت الرجل . هل يكنك شرح سبب ذلك ؟

٧- اذكر اربع كلمات ، بخلاف المذكورة فى هذا الباب ، يمكن استخدامها لاختبار شخص لديه فقد ملحوظ فى السماع عند الترددات المنخفضة .

٨- اذكر اربع كلمات ، بخلاف المذكورة فى هذا الباب ، يمكن استخدامها لاختبار شخص لديه فقد ملحوظ فى السماع عند الترددات العالية .

٩- شدة صوت معين هى $١٠^{-٦}$ وات /سم٢ ، ما هو مستوى شدة هذا الصوت .

(أ) بوحدات (البل) .

(ب) بوحدات (الديسيبل) .

افترض شدة مرجعية $١٠^{-١٦}$ وات / سم ٢ .

١٠- يسجل صوت ما شدة مستوها ٥٠ ديسيبل على جهاز قياس لعلو الصوت . ما هى شدة الصوت بالوات / سم ٢ . افترض شدة مرجعية $١٠^{-١٦}$ وات / سم ٢ .

١١- قارن بين " مدخل السماع " و " مدخل الاحساس " .

١٢- ارسم " أوديوجرام " نموذجيا لشخص للديه فقد شديد فى السماع فى مدى الترددات المنخفضة .

١٣- الكتلة الطولية لوترين على التوالى هى ٢٥ جرام / م ، ١٠٠ جرام / سم . فما هو التردد الاساسى للوتر الرفيع اذا كان الوتر السميك يصدر نغمة اساسية ترددها ٢٠٠ ذبذبة / ث . افترض ان الونرين لهما نفس الطول و نفس الشد .

١٤- وتران لهما نفس الكتلة الطوليه ، احدهما طوله ٦٠ سم تحت شدة قدره ١٦ كيلو جرام ، و الثانى طوله ٢٠ سم تحت شد قدره

٢٥ كيلو جرام . كيف يقارن التردد الاساسى للوترر الثانى مع التردد الاساسى للوتر الاول ؟

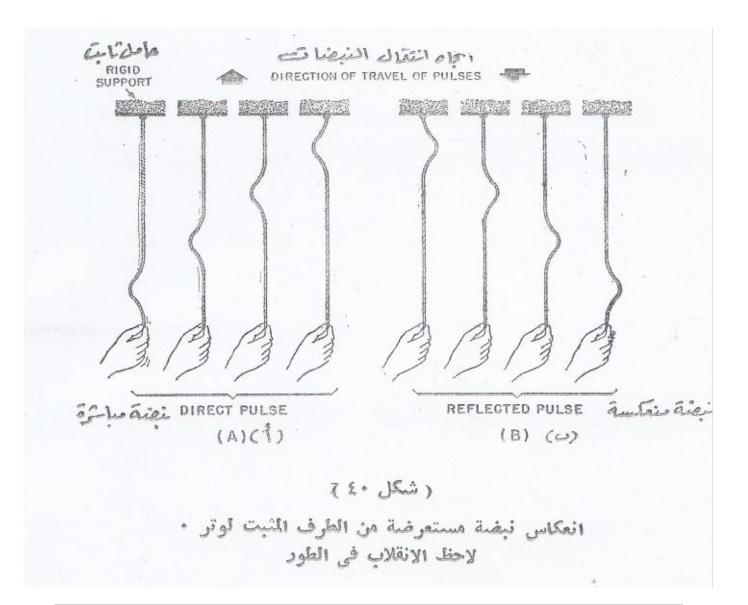
الباب الثالث

الطبيعة الموجية للصوت

١) حركة الموجات فى الاوتار :-

ستتناول فى هذا الباب ظواهر معينة فى مجال الصوت ، يعتمد توضيحها على فهم الحركة الموجية ، و ليس على الانتشار فى اشعة او فى خط مستقيم .

و لنبدأ بتثبيت وتر من طرفه الأعلى فى وضع رأسى مع ترك الطرف الأسفل حرا (شكل ٤٠) . و يبين الجزء (أ) من الشكل



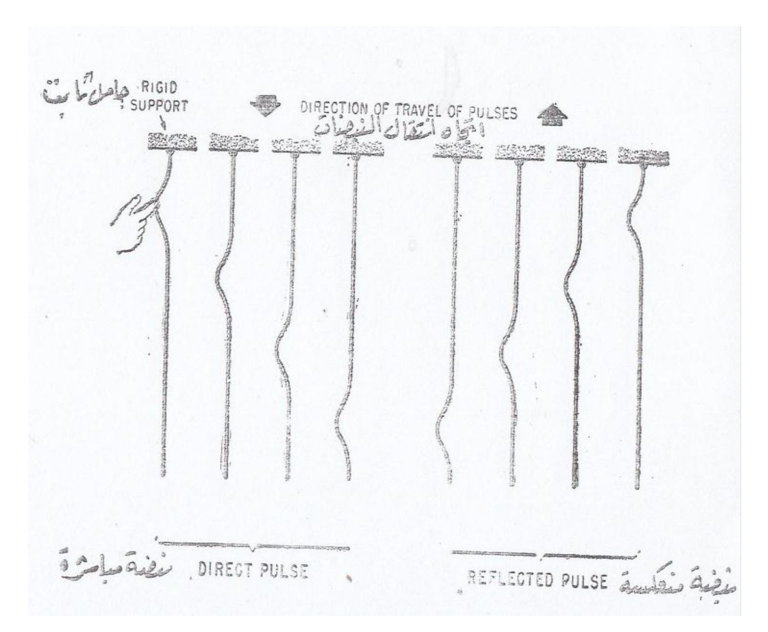
(شكل ٤٠) انعكاس نبضة مستعرضة من الطرف المثبت لوتر

لاحظ الانقلاب فى الطور

أربعة أوضاع متتابعة لنبضة موجية مستعرضة مرسلة الى اعلى على طول الوتر من الطرف الحر الىالطرف المثبت . وتكون هذه النبضة موجة انتقالية (*Traveling wave*) شكلها الموجى يتقدم فى اتجاه واحد ويبقى مقدارها (*Amplitude*) (مدى الزحزحة الوضعية) ثابتا دون تغير خلال فترة انتقال الموجة .

ونلاحظ فى الجزء (ب) من الشكل تحرك النبضة المنعكسة من الطرف الثابت . اذ نرى الآن ان كلا من اتجاه الانتقال وطوره (اى اتجاه الزحزحة الوضعية) مقلوبان . وتتقدم النبضة المنعكسة الى اسفل على طول الوتر ، كما هو مبين فى الشكل .

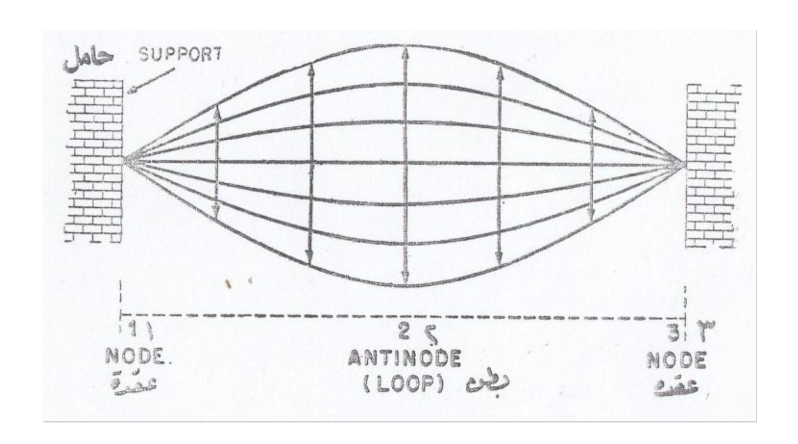
و يحدث طراز مختلف من الانعكاس ، اذا بدأت النبضة الاصلية من الطرف المثبت و ليس من الطرف الحر ، كما هو مبين فى (شكل ٤١) . وسينقلب اتجاه انتقال النبضة المنعكسة . دون طورها ، و ذلك بسبب التغير فى حالات الاطراف (*Boundary Conditions*) وسنتبين فى هذا الباب فيما بعد ، أن الاطراف الثبتة و الاطراف الحرة للأوتار تناظر الاطراف المقفلة و الأطراف المفتوحة لاعمدة هوائية مهتزة فيما يختص بانعكاس الموجات .



(شكل ٤١) انعكاس نبضة مستعرضة من الطرف الحر لوتر .
لاحظ انه لا يحدث انقلاب فى الطول

٢) الموجات الواقفة فى الأوتار"

اذا ارسلنا رتلا مستمرا من الموجات (*Wave Train*) بدلا من نبضة واحدة ، على طول وتر ، فان الموجات المباشرة و المنعكسة المتحركة فى اتجاهين مضادين قد تمتزج فى موجة واقفة *(Standing wave)* واحدة (شكل ٤٢) .



(شكل ٤٢)

وتر مهتز مثبت من طرفيه ويحمل ابسط موجة واقفة ممكنة الحدوث. وتبين الخطوط المنحنية الاوضاع اللحظية للوتر و تبين الاسهم اوضاع زحزحة الوتر .

(ولقد ذكر من قبل مثال للموجة الواقفة فى الباب الاول عندما تحدثنا عن تجربة "المدى" للأوتار المهتزة) . ويمثل الشكل رسما لوتر مهتز، مثبت عند طرفيه، يحمل ابسط موجة راقفة ممكنة الحدوث (وهى تناظر حالة الاهتزاز الاساسى) وتبين الخطوط المنحنية أوضاعا لحظية متعددة للوتر . (ويمكن رؤية كل منها اذا قمنا بتصوير الوتر المهتز بالة تصوير عالية السرعة) .

ومن الواضح أن شكل الموجة يكون الآن ثابتاً فى الفضاء ، رغم ان مقدار الاهتزاز المركب يتغير على طول الوتر . والنقط ١ ، ٣ هى العقد (جمع عقدة) (*Nodes*) أو نقطة اقصى اضطراب. والنقطة ٢

هى البطن (*Antinode or loop*) او نقطة اقصى اضطراب. هل يمكنك ان تبين لماذا يجب ان تكون الاطراف المثبتة عقدا؟

ونتذكر من الباب الاول ان المسافة بين عقدتين متتاليتين هى نصف الطول الكامل للموجة (ل) وينتج عن ذلك ان ابسط الاهتزازات الممكنة لوتر يجب أن يكون لها طول موجى يساوى ضعف طول الوتر، اى :ل = ٢م

حيث م هى طول الوتر المثبت عند طرفيه . ويمكن الحصول على التردد ت لهذه الحالة الاهتزازيةالبسيطة بأن نقسم السرعة ع (سرعة الموجة فى الوتر) على ل ، وبذلك يمكن بيانها بالعلاقة : $ت = \frac{ع}{٢م}$

لاحظ ان هى الطول الموجى لاهتزاز الوتر ، وليس الطول الموجى للنغمة الموسيقية التى قد يصدرها هذا الاهتزاز فى الهواء .

فاذا اهتز الوتر انصافا (اى يهتز كل نصف من الوتر ، وهنا تتكون عقدة اضافية فى منتصف الوتر) ، فان الطول الموجى للاهتزاز (التوافق الثانى) يساوى طول الوتر بالضبط . اى :

لَ = م

والعلاقة الاتية تعطى التردد لهذا الاهتزاز الجزئى :

$ت' = \frac{ع}{م}$ وهو ضعف التردد الاساسى .

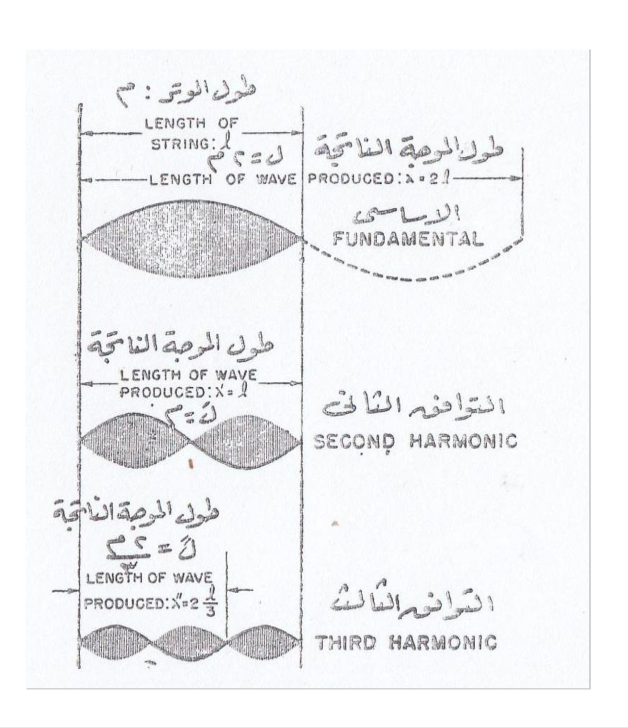
فاذا اهتز الوتر ثلاثاً (اى كل ثلث من الوتر) ، فان : ل = $\frac{٢م}{٣}$ و

تردد حالة الاهتزاز الجديدة (التوافق الثالث) تبينه العلاقة الآتية : $ت'' =$

$$\frac{ع}{\frac{٢م}{٣}} = \frac{٣ع}{٢م}$$

وهى ثلاثة امثال التردد الاساسى .

ويبين (شكل ٤٣) حالات الاهتزاز الثلاث التى وصفناها الآن، والطول الموجى لكل منها . ومن الواضح ان السلسلة التوافقية *(Harmonic Series)* المكونة من ترددات النسبة بينها كنسبة ١ : ٢ : ٣ : ٤ ... الخ ، ممكنة الحدوث لوتر مثبت عند طرفه .



(شكل ٤٣) حالات اهتزاز وتر مثبت عند طرفيه ، و الطول الموجى لكل منها

مسألة ١ : سرعة انتشار موجة مستعرضة فى وتر طوله ٥ اقدام ومثبت عند طرفيه هى ٤٠٠ قدم / ث . ما هو التردد الاساى للاهتزاز ؟ و ما هو تردد التوافق الثانى ؟

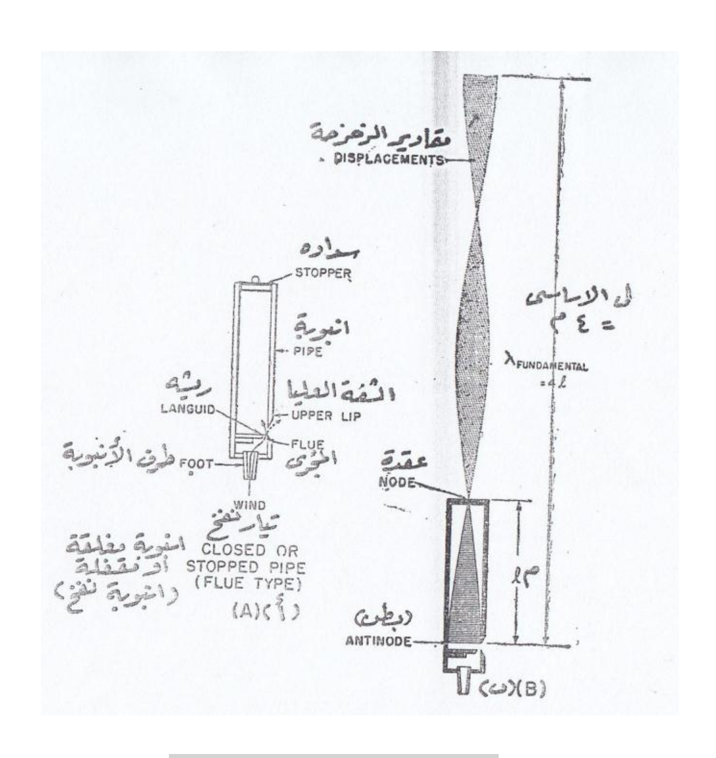
الحل : عندما يهتز الوتر ككل ، ل = ٢م = ١٠ اقدام . و التردد الاساسى = $\frac{٤٠٠}{١٠}$ = ٤٠ ذبذبة/ث .

و تردد التوافق الثانى هو ضعف التردد الاساسى اى ٨٠ ذبذبة / ث .

٣) الموجات الواقفة فى الأعمدة الهوائية :ـ

يبين (شكل ٤٤) انبوبة نفخ مغلقة أو " مقفلة " . و يهتز عمود الهواء عند نفخ الهواء موجها نحو الطرف الحاد أو الشفة و تحدث الموجات الواقفة فى الانبوبة ، بأقصى مقدار عند الشفة ، و يتلاشى المقدار الى الصف عند الطرف المغلق . (و لسهولة الايضاح ، يبين الشكل القيم المختلفة للزحزحة كخطوط مستعرضة) و واضح من الشكل ان الطول الموجى الكامل للاهتزاز (و الطول الموجى للصوت فى الهواء) خو أربعة أمثال طول الانبوبة ، اى ل = ٤م . و تردد الحالة الاهتزازية المذكورة (التردد الاساسى) تبينه العلاقة ت = $\frac{ع}{٤م}$ ، حيث ع هى سرعة الصوت فى الهواء .

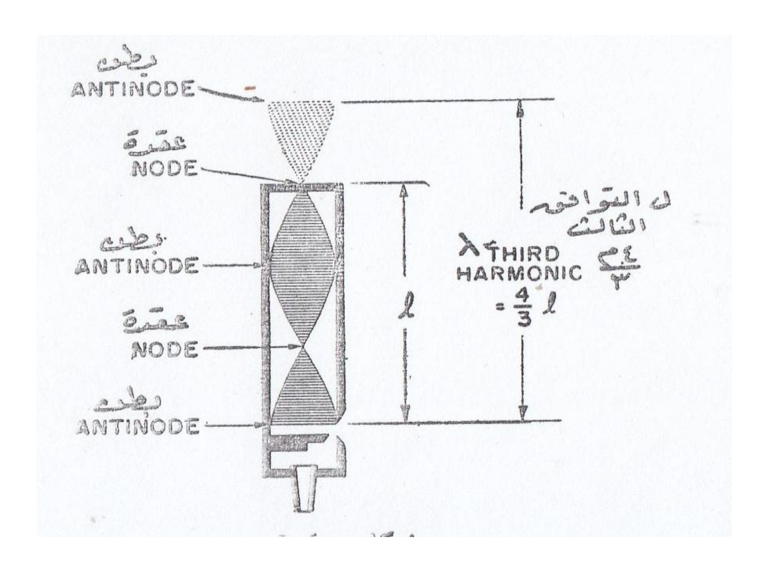
ويبين (شكل ٤٥) الموجة الواقفة التالية الممكن حدوثها فى انبوبة مغلقة . ويلاحظ الآن وجود عقدتين (عند تلاشى المقدار) احداهما عند الطرف المغلق للانبوبة ، والاخرى على بعد ثلثى طول الانبوبة من نفس الطرف . و يبين فحص نموذج المقدار المشمول فى المساحة المظللة من الرسم (و مبين جزء منه خارج الانبوبة نفسها) ، ان الطول الموجى للتوافق الناتج الآن هو $\frac{ع}{\frac{٤م}{٣}}$ اى $\frac{٣ع}{٤م}$.و حيث ان هذا التردد هو ثلاثة امثال التردد الاساسى فان التوافق الناتج هو التوافق الثالث .



(شكل ٤٤) انبوبة نفخ مغلقة :

(ا) قطاع فى الانبوبة

(ب) الاهتزاز الاساسى لعمود الهواء فى الانبوبة مبينا العلاقة بين طول الانبوبة وبين الطول الموجى



(شكل ٤٥)

اهتزاز عمود الهواء فى انبوبة النفخ المغلقة التى يصدر عنها التوافق الثالث .

ويمكن ايضاح ان حالة الاهتزاز التالية الممكن حدوثها ينتج عنها التوافق الخامس ، ويليها التوافق السابع ، و هلم جرا .

وتوجد التوافقيات الفردية فقد فى اهتزازات الانبوبة المغلقة او المقفلة .

مسألة ٢ : ما هو تردد النغمة الاساسية الناتجة من أنبوبة مغلقة طولها ٢ قدم عند نفخها فى الهواء عند درجة حرارة ٢٥ درجة مئوية ؟ ما هو تردد كل من التوافقين التاليين الممكن حدوثهما ؟

الحل : ل اساسى = ٤م = ٨ اقدام .

التردد الاساسى = $\frac{[١٠٨٨ + (٢ \times ٢٥)]}{٣}$ = **١٤٢,٢٥ ذبذبة /ث**

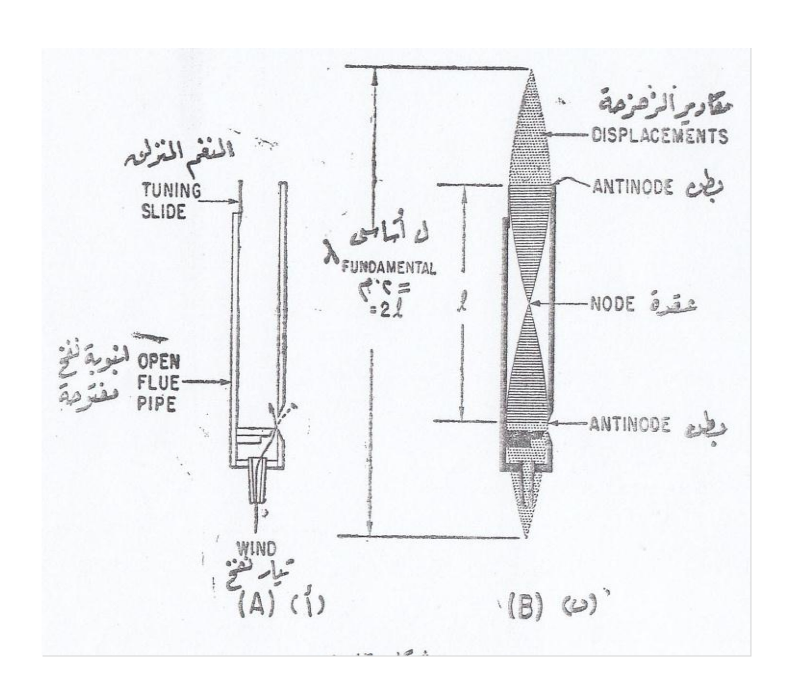
التوافق التالى الممكن حدوثه هو التوافق الثاثل

وتردده = ٣ × ١٤٢,٢٥ = ٤٢٦,٧٥ ذبذة \ ث .

والتوافق التالى هو التوافق الخامس و تردده = ٥ × ١٤٢,٢٥ = ٧١١,٢٥ ذبذبة / ث .

والانبوبة المفتوحة هى تلك التى تكون مفتوحة عند كل من طرفيها وفى هذه الحالة، فانها تمثل حالات مختلفة للأطراف. ويبين (شكل ٤٦) نموذجا لقيم الزحزحة المتعلقة بأبسط حالة للاهتزاز (الاهتزاز الاساسى) فى انبوبة مفتوحة. ويلاحظ وجود عقدة واحدة عند منتصف الانبوبة ، وبطن عند كل طرف مفتوح . ونرى الان ان ل = ٢م . وتردد الاهتزاز هو $\frac{ع}{٢م}$ ، او الضعف تماما لتردد انبوبة مغلقة مساوية فى الطول.

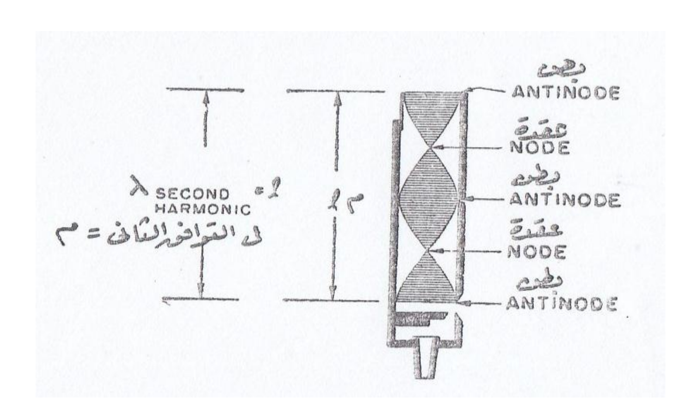
ويمكن أيضا نفخ الانبوبة لإحداث نموذج واقفة اكثر تعقيدا (شكل ٤٧) . لاحظ مواضع العقد والبطون . وفى هذه الحالة لَ تساوى الطول الكامل م للأنبوبة . والتردد هو $\frac{ع}{م}$ اى ضعف التردد الاساسى. وهكذا يتولد التوافق الثانى .



(شكل ٤٦) انبوبة نفخ مفتوحة :

(ا) قطاع فى الانبوبة ،

(ب) الاهتزاز الاساسى لعمود الهواء .



(شكل ٤٧) انتاج التوافق الثانى فى انبوبة النفخ المفتوحة

ويمكن للقارىء ان يتحقق بنفسه من أن جميع التوافقيات الممكنة يمكن انتاجها بوساطة انبوبة مفتوحة ، بترددات نسبتها ١ : ٢ : ٣ : ٤: ... الخ . و يعتبر ذلك تبيانا مخالفا لحالة الانبوبة المغلقة حيث تكون نسبة سلسلة التوافقيات كنسبة ١ : ٣ : ٥ .. الخ . و لذلك فان نوع الصوت الذى تبثه انبوبة مفتوحة يختلف عن ذلك الذى تصدره انبوبة مقفلة ، حتى و لو جعلنا النغمات الاساسية لكل منها متماثلة بالاختيار لطول كل من الانبوبتين .

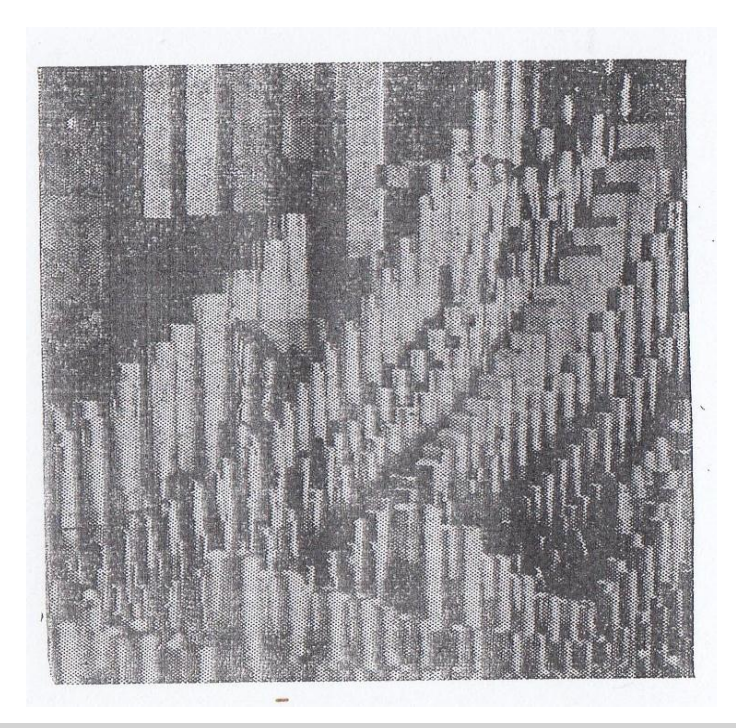
مسألة : سرعة الصوت فى الهيدروجين ٤١٦٥ قدما / ثانية . ما هو تردد النغمة الاساسية التى تحدثها انبوبة مفتوحة طولها قد واحد و مملوءة بالهيدروجين ؟

الحل : ل = ٢ م = ٢ قدم ، ت = $\frac{\text{ع}}{\text{ل}}$ = $\frac{٤١٦٥}{٢}$ = ٢٠٨٢,٥ ذبذبة / ث .

ويبين (شكل ٤٨) بعض انابيب ارغن كبير . وتظهر فى المجموعة الامامية انابيب النفخ المفتوحة الخشبية والمعدنية ، كما تظهر فى الخلف الانابيب المغلقة . لاحظ كيف يزداد طول الانابيب .

وحيث ان طول الانبوبة يتناسب على وجه التقريب تناسب عكسيا مع تردد النغمة الاساسية التى تصدرها ، فان الانابيب تتضاعف اطوالها لكل "اوكتاف" . وفى السلم الموسيقى المتساوى التنغيم *equal*)

(*tempered scale* ينقسم كل " اكتاف " الى اثنتى عشرة نغمة بين كل منها نفس الفاصلة الموسيقية . و نظرا لتضاعف الترددات لكل " اوكتاف " ، فان حاصل ضرب نسب التردد للأنابيب الاثنتى عشرة كلها يجب ان يساوى ٢ ، و حيث ان النسبة ثابتة بين اى انبوبتين متتاليتين ، فان كل انبوبة تكون اطول بنسبة $\sqrt[١٢]{٢}$ (اى حوالى ١,٠٦) من الانبوبة المجاورة لها التى تعلوها فى الدرجة



(شكل ٤٨) بعض انابيب الأرغن فى صالة " مثوين " بولاية " ماساشوستس " .

ويتحدد نوع النغمات من الصفوف المختلفة للانابيب حسب نسبة الطول الى القطر لكل منها ، و حسب ما اذا كانت مغلقة او مفتوحة ،

خشبية او معدنية ، و حسب ما اذا كان شكلها مستقيماً او مخروطياً او مخروطياً مقلوباً . و تنغم الانابيب بضبط اطوالها (بتحريك السدادة فى الانابيب المقفلة او المنغم المنزلق فى الانابيب المفتوحة) أو بتضييق او توسيع الطرف المفتوح ، مما يغير الطول الفعال للأنبوبة . (و سنناقش هذا فيما بعد فى هذا الباب) .

٤) آلات النفخ :ـ

تصدر آلات النفخ الخشبية و النحاسية نغمات موسيقية باهتزاز اعمدة الهواء . وتنشأ الاهتزازات عن نوع ما من الاضطرابات عند أحد طرفى العمود ، وقد يكون ذلك حركة شفاه العازف (البوق او الترومبا) *(Trumpet or Trombone)* **او اهتزاز ريشة واحدة من البوص (الكلارينيت)** *(clarinet)* **أو ريشة مزدوجة (الابوا)** *(oboe)* **أو نفخ تيار من الهواء عبر فتحه فى انبوبة (الفلوت)** *(flute)* **.**

ويتم التحكم فى الدرجة فى آلات النفخ بضبط طول "الانبوبة". ففى الترومبا يتم هذا الضبط بوساطة مكبس منزلق ، وفى الفلوت وغيره من آلات النفخ الخشبية يتم تغيير الطول الفعال للأنبوبة بفتح أو قفل الفتحات التى على جانب الآلة .

وفى (البوق الفرنسى)*(French horn)* **تستخدم مجموعة من الصمامات لهذا الغرض .**

ويمكن لعازف آلة النفخ أن يدفع عمود الهواء فى الآلة . وهذا يعادل اصدار تردد اساسى جديد ، ويمكن حينئذ تقصير طول الانبوبة (باستخدام الصمامات او الاصابع) لاصدار مدى اضافى من النغمات .

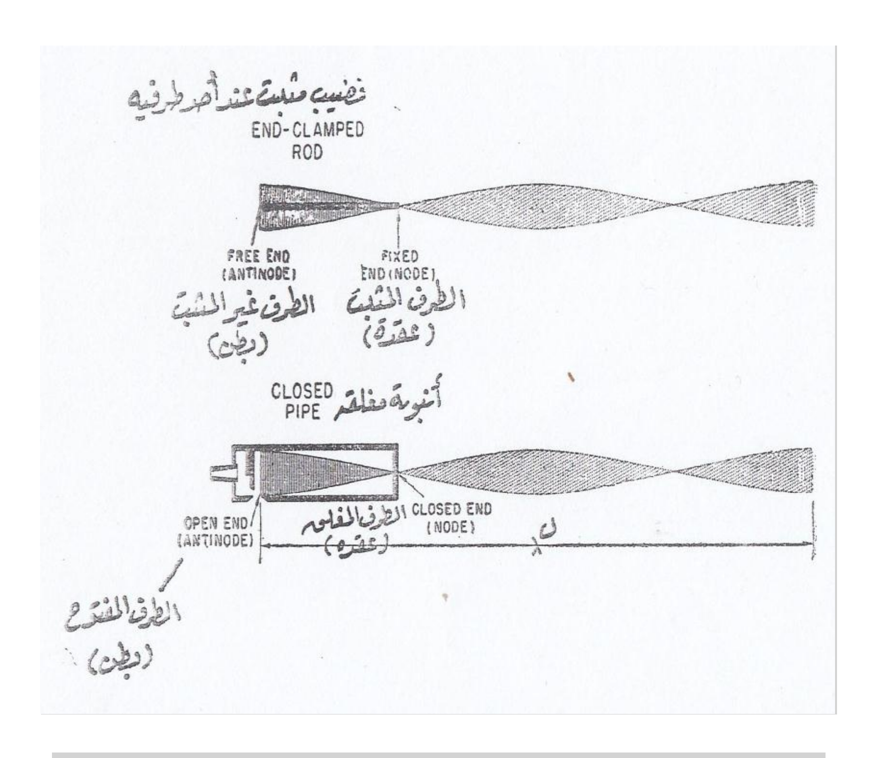
وآلة (البروجى)(*bugle*) ليست مزودةبمثل هذه الوسيلة لتقصير الطول، ولذلك فانها مقصورة على عزف النغمات التى يقع ترددها الاساسى فى السلسلة التوافقية لاكثر نغماتهاانخفاضا.

ويجب أن يكون لآلات النفخ الخشبية عدد كاف من الفتحات الجانبية لاصدار النغمات التى تقع بين النغمة الاساسية والتوافق التالى (اما او كتاف كامل ، واما $\frac{٦}{٥}$ أو كتاف ، ويعتمد ذلك على ما اذا كانت الآلة تعمل كأنبوبة مفتوحة او انبوبة مغلقة) . وتستخدم الالآت النحاسية ذات الصمامات ، ثلاثة صمامات فقط ، ويمكن بوساطتها منفردة او مع بعضها البعض ، تغطية الفاصلة الموسيقي بين التوافق الثانى و الثالث (وفى أغلب الأحيان لا يمكن اصدار التردد الاساسى الحقيقى) .

ويتحدد العلو فى آلات النفخ بالطاقة المنقولة الى العمود الهوائى المهتز، وكذلك بحجم الهواء الذى يدفع الى الحركة . والى حد كبير بحد اقصى علو يمكن لآلة نفخ معينة أن تصدره عند زيادة الطاقة الداخلة (أى عند زيادة قوة النفخ فيها) .

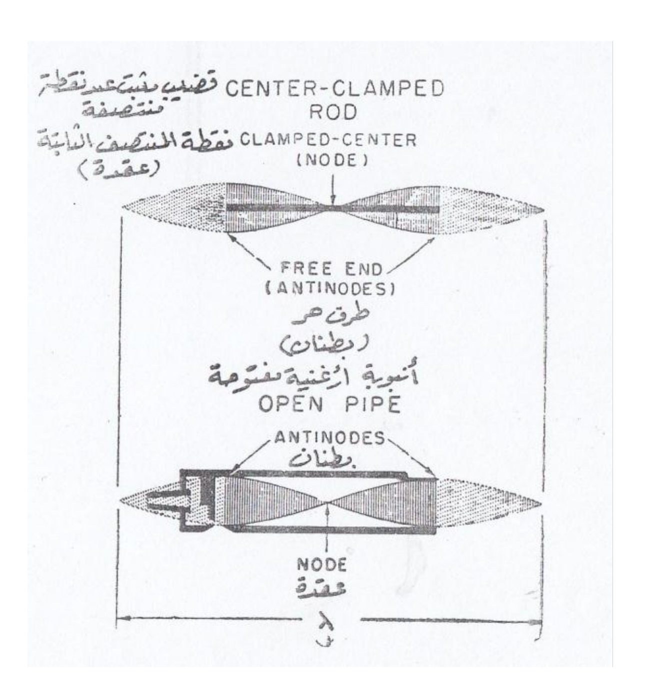
٥) الموجات الواقفة فى القضبان الطويلة :

و لعله من المهم أن نقارن الاهتزاز الطولى الاساسى بالتاثير على قضيب مثبت عند أحد طرفيه ، من الاهتزازات الناتجة فى انبوبة غنية مقفلة (شكل ٤٩) . و يعادل كل منهما الاخر من الوجهة الاهتزازية . ففى كل حالة منهما ، يكون الطول الموجى أربعة امثال الطول المهتز . ويلاحظ التشابه فى مواضع العقد و البطون .



(شكل ٤٩) الموجات الواقفة فى قضيب مثبت عند احد طرفيه و فى عمود الهواء لانبوبة ارغنية مقفلة .

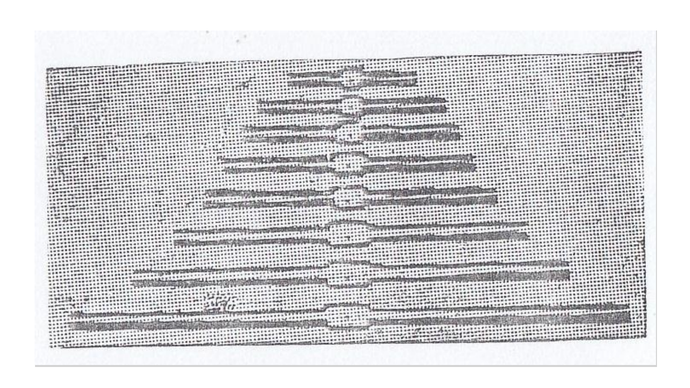
و يلاحظ ايضا ان هناك تشابها كبيرا فى الصوتيات بين قضيب مثبت عند نقطة منتصفة و أنبوبة ارغنية مفتوحة عند طرفيها (شكل ٥٠) . فان الاطوال الموجية تكون فى هذه الحالة ضعف الاطوال المهتزة ، وتحدث العقد و البطون عند نقط متناظرة كما وضح ذلك من قبل .



(شكل ٥٠) الموجات الواقفة فى قضيب مثبتعند نقطة منتصفة و فى انبوبة ارغنية مفتوحة .

ومن المهم ملاحظة ان الطول الموجة للموجات الواقفة فى حالة القضيب المهتز ، تماما كما هو فى حالة الوتر المهتز ، يكون ضعف ذلك الطول الموجى لاهتزاز القضيب نفسه ، بينما يكون الطول الموجى المرتبط بالانبوبة المفتوحة ضعف الطول الموجى للصوت فى الهواء .

و يبين (شكل ٥١) مجموعة من قضبان التنغيم المصنوعة من سبيكة الالمونيوم ، مصممة للتثبيت عند منتصفها . و ينغم كل قضيب ليصدر نغمة نقية ذات تردد خاص .



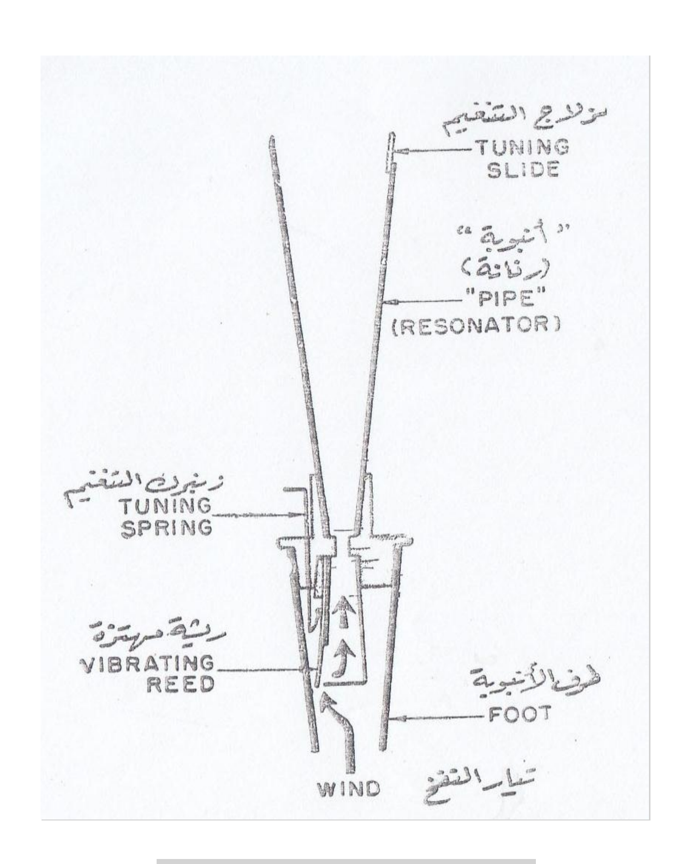
(شكل ٥١) مجموعة من قضبان التنغيم مصنوعة من سبيكة الالمونيوم يصدر كل منها نغمة نقية ذات تردد خاص .

ويستخدم الارغن " ريش " (جمع ريشة) لاصدار نغمات مختلفة النوع لا يمكن انتاجها بمثل هذه السهولة فى الانابيب .

(وعلى سبيل المثال: فالهارمونيوم – و هو نوع من الارغن الصغير – والميلوديون – نوع اخر – لا تستخدم الانابيب على الاطلاق) .

ويبين (شكل ٥٢) نموذجا لأنبوبة ارغن ذات ريشة.

وتتنغم بتقصير الطول المهتز للريشة، حيث تعمل النبوبة التى تعلوها كانبوبة رنانة تتحكم فى نوع الصوت .



(شكل ٥٢) انبوبة ارغن ذات ريشة

٦) الاهتزازات القسرية :ـ

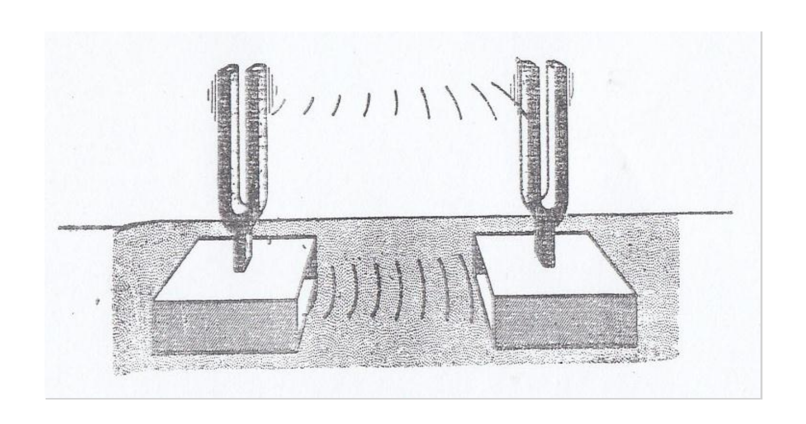
ضع ساق شوكة رنانة مهتزة على بب ، او فوقمكتب ، او على سبورة . فى هذه الحالة سوف تسمع صوتا أعلى بكثير – و ان كان أقصر بقاء – من ذلك الصوت الذى نسمعه لو أمسكنا الشوكة الرنانة فى الهواء . ونسمى الاهتزاز الناتج فى الباب ، أو المكتب ، او السبورة، اهتزازاً قسرياً . و تعمل كل من طبلة الاذن و حاجز مكبر الصوت وفق

نفق القاعدة . وتزداد فاعيلية الاوتار الموسيقية عند بطها، بوساطة قنطرة، الى لوح رنان، وهى ضعيفة الاشعاع للطاقة الصوتية بغيرذلك .

والاهتززات القسرية ظاهرة غير انتقائية . وهى تحدث عندما يختلف تردد النبضات المستخدمة عن التردد الطبيعى أو المميز للجسم المستجيب . والأثر ، وان كان واضحاً، الا أنه قصير البقاء ما لم تتم تغذية النبضات المؤثرة بصفة مستمرة .

٧) **الرنين** :

ضع جنبا الى جنب شوكتين دقيقتى الصناعة و متوازنتين ، لكل نهماتردد اساسى **٢٥٦** ذبذبة / ث مثلا . وقم بتركيب كل منهما على صندوق رنان منغم الى هذا التردد . و رتب وضع الاجهزة فوق المنضدة، بحيث تواجه فتحة كل صندوق الاخرى (شكل **٥٣**). ادفع احدى الشوكتين الى الاهتزاز بدقها بمطرقة من المطاط . ثم اوقف هذا الاهتزاز بوضع يد واحدة على فرعى الشوكة المطروقة . سنسمع حينئذ صوتا مستمراً خافتاً، ولكنه واضح لا تخطئه الأذن. ويأتى هذا الصوت من الشوكة الثانية (غير المطروقة) ، حيث يمكن اثبات ذلك بكتم اهتزازها باليد الأخرى . وقد دفعت الشوكة الثانية الى حالى الاهتزاز بوساطة النبضات ذات التوقيت الخاص التى تغذى وفق نوبات منتظمة ، و الصادرة من الشوكة الأولى ، و المنقولة منها عن طريق الهواء و المنضدة التى تحمل الاجهزة .



(شكل ٥٣) الاهتزاز المتجاوب لشوكتين رناننين متماثلين

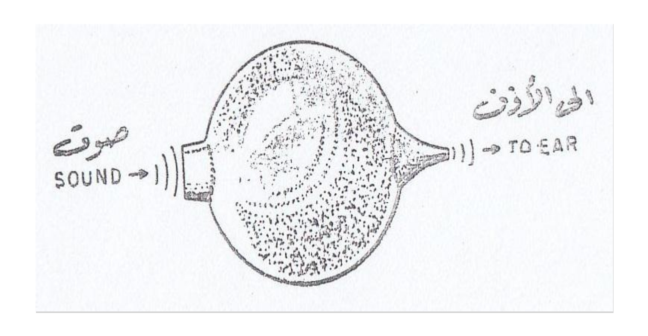
و نسمى هذا الشكل من الاستجابة المنغمة (سواء كان يحدث فى الصوت ، أو الضوء ، او الراديو ، او فى اهتزازات ميكانيكة بحتة) الرنين (*resonance*) أو الاهتزاز المتجاوب . وتحدث هذه الظاهرة عندما يكون تردد النبضات المؤثرة مساوياً تماماً للتردد الطبيعى للجسم المستجيب أو قريبا جدا منه .

وتعتمد فاعلية استجابة الرنين كذلك على المسافة بين " المرسل" و"المستقبل"، وخواص الترابط أو "الربط" بين الجسمين. ويقال ان الترابط ضعيف بين شوكتين رنانتين متجاوبتين اذا فصلت بينهما مسافة كبيرة . ويكون انتقال الطاقة بينهما فى هذه الحالة صغيراً . ومن ناحية أخرى يمكن وصفهما بأنهما محكمتا الترابط اذا قربت احداهما من الاخرى، وفى هذه الحالة يمكن حدوث تبادل كبير للطاقة . ووضع الشوكتين على قطعة من اللباد اقل اثرا من وضعهما على منضدة خشبية ، حيث تكون المنضدة اكثر صلاحية لنقل الاهتزازات المسببة للاستجابة.

ولقد ذكرنا من قبل استجابة لهب حساس الى بعض الاصوات ذات الترددات العالية ، مثل تلك الصادرة من صفارة جالتون ، فى الباب الاول ويمكن دفع حوائط المسارح وصالات الموسيقى والقاعات الى الاهتزاز بواسطة نغمات موسيقية معينة ترددها مساو أو قريب جدا لترددها الطبيعى. وتعتبر مثل هذه الاستجابات غير مرغوب فيها من ناحية الصوتيات وتستدعى اجراء تعديلات انشائية او زخرفية مصممة لتقليل انتقال الطاقة بواسطة الرنين .

ورنان هيلمهولتز *(Helmholtz resonator)* (شكل ٥٤) هو قشرة كروية لها فتحة كبيرة عند أحد طرفيها واخرى صغيرة عند الطرف الاخر . ويمكن استخدامه لتمييز اهتزازات ذات تردد خاص تكون منغمة اليه بدقة . فاذا وضعنا الاذن عند الفتحة الصغيرة ، ووجهنا نحو الفتحة الكبيرة صوتا تردده مسار لتردد الفجوة الهوائية ، فاننا بذلك ننشىء نظاما محكم الترابط ويحدث

تكبير ضخم للصوت . واستخدام مجموعة من مثل هذه الاجسام الرنانة (بأحجام متدرجة) هو أحد طرق تحليل موجة الصوت المركبة ، وذلك بتعيين أى الاجسام الرنانة يستجيب للتوافقيات الموجودة فى الموجة وتقدير مقدار هذه الاستجابة. وبعض آلات الايقاع مثل الاكسيلوفون *(xylophone)* والفيبرافون *(vibraphone)* تستخدم أجساما رنانة منغمة الهواء تحت القضبان .

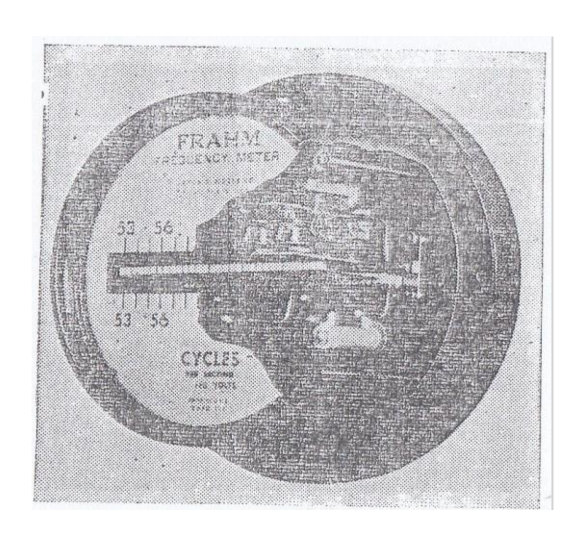


(شكل ٥٤) رنان هلمهولتز

واثار الرنين غزيرة فى مجال الميكانيكا . ويعزى انهيار كوبرى (تاكوما نروز) المعلق (*Takoma Narrows*) فى عام ١٩٤٠ الى الاهتزازات المتجاوبة التى حدثت بالتأثير على تكوينه بوساطة ريح سرعتها ٤٢ ميلا فى الساعة . ومن المحتمل حدوث اهتزازات خطيرة كبيرة المقدار فى قنطرة صغيرة عند عبور طابور من الجنود يسيرون بخطوة منظمة . ولهذا السبب ، يعطى الأمر عادة بعدم السير بالخطوة النظامية عندما يصل الجنود الى القنطرة . والرنين هو السبب فى اعتبار تربينة البخار الدائرة اكثر أماناً ، كمحرك ابتدائى بحرى، من الالة البخارية العادية ذات الحركة المتناوبة ، التى قد تكون نوبة عكس الحركة بها مساوية للنوبة الكبيعية لتموج أو اهتزاز الباخرة .

و يجد مثالا طريفا للرنين الكهربائى الميكانيكى المركب فى جهاز قياس التردد ذى الريشة الرنانة (شكل ٥٥) . و يتكون " مشط " الرشات من ريشات متتابعة التنغيم ، يتم اهتزازها

بواسطة القلب المعدنى لمغناطيس كهربى . و تشبه الريشة فى حالة الرنين مع التيار المستخدم سوطاً يتذبذب على مدى قوس كبير ، بينما تستجيب الريشات الخرى التى تختلف ترDDاتها الطبيعية عن التردد الكهربائى المستخدم استجابة ضعيفة فقط .



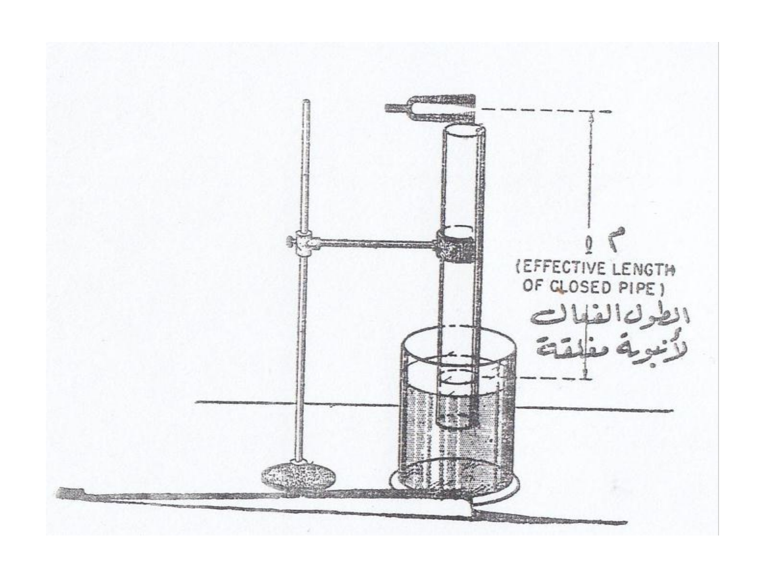
(شكل ٥٥) منظر مقطوع لجهاز قياس التردد ذى الريشة الرنانة .

وينغم جهاز الاستقبال بضبط النوبة الطبيعية لتذبذبه الكهربائى على تلك الذبذبة الخاصة بموجة الاذاعة الواردة . وكما هو الحال فى رنين الصوتيات والرنين الميكانيكى ، تنتقل الاهتزازات الكهربائية بكفاءة عالية بالترابط المحكم بين المرسل و المستقبل .

٨) الرنين فى أعمدة الهواء :ـ

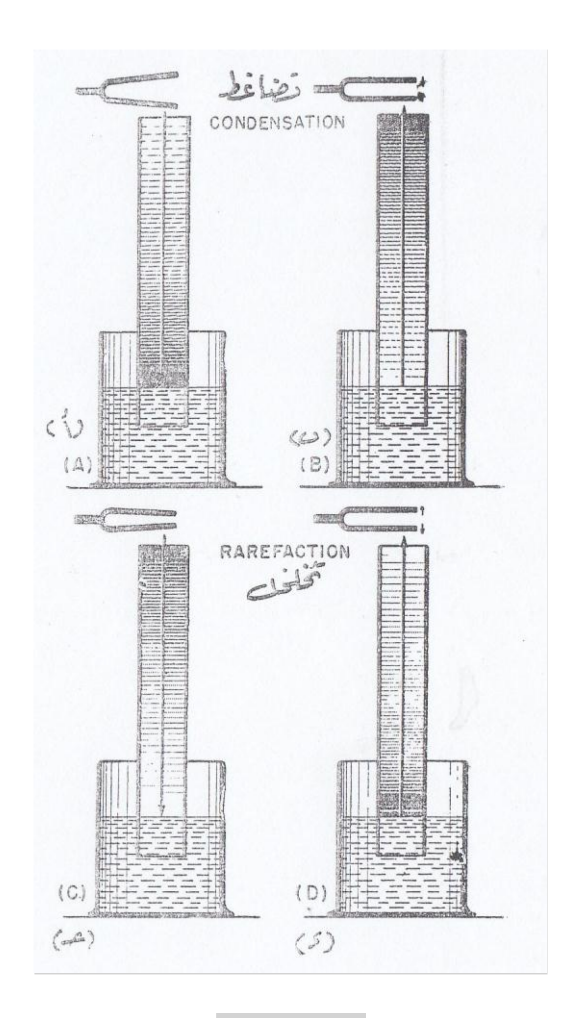
و لنطبق قاعدة الرنين على اعتبار تبادل الطاقة المهتزة بين شوكة رنانة و عمود هواء مقفل ، ثم ضبط تردده الطبيعى (بتغيير طوله) على تردد الشوكة (شكل ٥٦) (وسنفترض أن الانبوبة ليس بها احتكاك داخلى، وأن جدرانها صلدة، وان قطرها صغير بالنسبة الى الطول الموجى للصوت، وان موجات الصوت فى الانبوبة مستوية) فعند الطرف المفتوح ، تنتشر الموجة المنعكسة بشكل كروى . ويقع مركز هذه الكرة عند فوهة الانبوبة .

ونتيجة لذلك ، يهتز جزء من الموجات المنحنية كما لو كان ما زال بداخل الانبوبة رغم انه فى الواقع خارجها . لهذا السبب ، فان الطول الفعال للانبوبة " م " يكون اكبر بعض الشيء من الطول الذى يتم قياسه بين طرفى الانبوبة ، و قد دلت التجارب على انه يجب اضافة تصحيح نسبته حوالى ٣٠ فى المائة من القطر الداخلى للأنبوبة المقفلة الى طول الانبوبة المقيس للحصول على طولها الفعال .



(شكل ٥٦) جهاز تجارب الرنين

ويبين (شكل ٥٧) رسما توضيحياً لاربع خطوات متتابعة للأثر المتبادل بين شوكة رنانة و أنبوبة مقفلة مضبوطة للحصول على اقصى استجابة للصوتيات (رنين) .



(شكل ٥٧)

تحليل الرنين : حلة واحدة كاملة ذهاباً و اياباً لرتل من التضاغط و التخلخل تساوى الطول الموجى للصوت الصادر من الشوكة و المدعم لعمود الهواء .

وعندما تنجز الشوكة الربع الاول من اهتزازتها الكاملة (الفرعان فى تباعد) ، تنتقل نبضة تضاغط الى اسفل فى الانبوبة، وتنعكس تضاغط من الطرف المقفل حيث تتكون عقدة (حتما) ، ثم ينتقل الآن

التضاغط المنعكس الى اعلى حيث يصل الى فوهة الانبوبة تماما فى نفس اللحظة التى تتم فيها الوكة الربع الثانى لاهتزازتها . و عندما يتقارب فرعا الشوكة ، يتكون تخلخل و ينتشر الى اسفل ، حيث يصل الى الطرف المقفل فى الوقت الذى تتم فيه الشوكة الربع الثالث لاهتزازاتها . و ينعكس التخلخل كتخلخل و يعود الى الطرف المفتوح فى الوقت الذى تتم فيه الشوكة اهتزازاتها الكاملة . و تتكرر الدورة الآن عندما تبدأ الشوكة اهتزازاتها التالية .

ويتضح من هذا أن الموجة الصوتية تنتقل مسافة تعادل أربعه امثال طول الانبوبة خلال الوقت اللازم لكل من الشوكة و عمود الهواء لانجاز اهتزازة كاملة . و لذلك يكون الطول الموجى للصوت الناتج هو اربعة امثال الطول الفعال لعمود الهواء . ل = ٤ م ، و هى النتيجة التى سبق أن وصلنا اليها عند دراسة الموجات الواقفة فى الأنابيب المقفلة .

مسالة ٤ : عمود هوائى مقفل رنان طوله ٨,٥ بوصه و عرضه ٢ بوصة يكونفى حالة رنين مع شوكة رنانة مجهولة التردد. فاذا كانت درجة حرارة الهواء ١٦ درجة مئوية ، فما هو تردد اهتزاز الشوكة ؟

الحل :

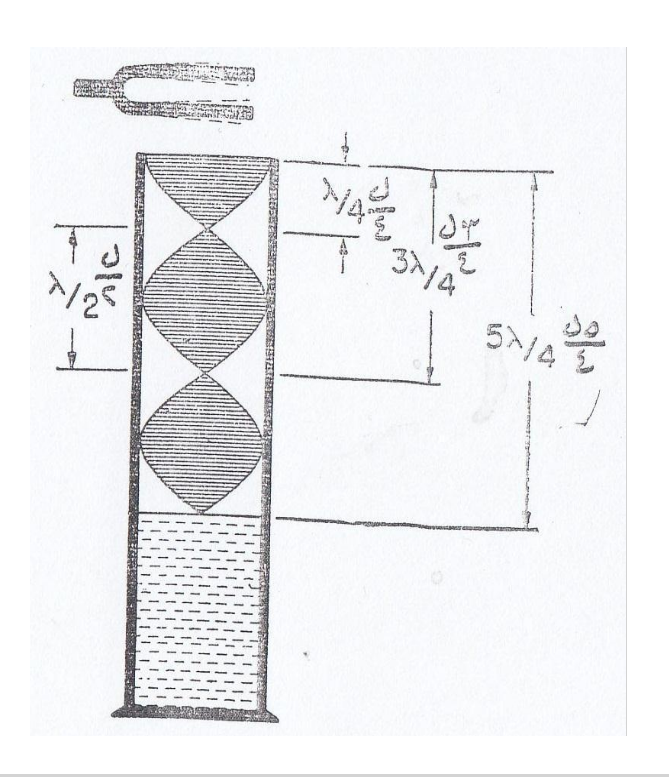
م = ٨,٥ +(٠,٣ × ٢) = ٩,١ بوصة

ل = ٤م = ٣٦,٤ بوصة

= ٣,٠٣ قدما

$$ت = \frac{ع}{ل} = \frac{[\,١٠٨٨ + (٢ \times ١٦)\,]}{٣,٠٣} = ٣٦٩$$ ذبذبة / ث .

و لا تتكون الموجات الواقفة فى العمود الرنان عندما يكون طول العمود $\frac{ل}{٤}$ فحسب ، و لكن ايضا عندما يصبح الطول $\frac{م\,ل}{٤}$ ، $\frac{٥ل}{٤}$ أو أى مضروب فردى للطول $\frac{ل}{٤}$. و على ذلك تكون المسافة بين وضعين رنانين متاليين هى $\frac{ل}{٣}$. و نظرا لان نفس التصحيح ينطبق على كل وضع ، فيمكننا اهماله كلية مع استخدام الفرق بين وضع $\frac{ل}{٤}$ و وضع $\frac{٣ل}{٤}$ ، مثلا ، كنصف الطول الموجى الصحيح للصوت الذى تختبره . و يبين (شكل ٥٨) توزيع العقد و البطون لحالات الرنين المختلفة .



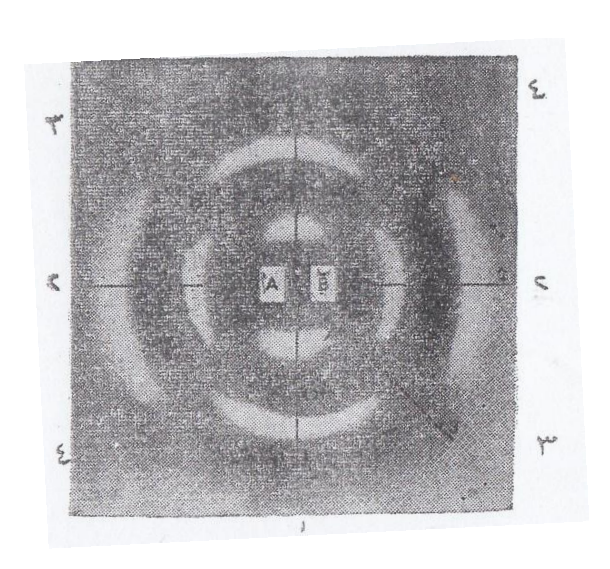
(شكل ٥٨) الموجات الوقفة و العقد و البطون فى عمود الهواء الرنان .

وعند استخدام انبوبة مفتوحة كجسم رنان ينعكس التضاغط المرسل فى الانبوبة كتخلخل ، و من ثم فانه يكفى النبضة رحلتين داخل الانبوبة لتتم دورة كاملة لما يحدث . و نستنتج من ذلك ، انه فى هذه الحالة ل = ٢ م اى م = $\frac{ل}{٢}$ ، مما يؤيد النتيجة التى سبق الوصول اليها عند تحليل الموجة الواقفة . و يكون التصحيح النهائى

الذى يجب استخدامه فى هذه الحالة هو ٦٠ فى المائى من القطر الداخلى للأنبوبة . فاذا اخذنا انبوبتين متساويتين فى الطول ، م ، فان الانبوبة المقفلة تكون فى حالة رنين و ترسل صوتا طوله الموجى ل = ٤ م ، كما ترسل الانبوبة المفتوحة صوتا طوله الموجى ل = ٢ م . و يعادل هذا القول بأن الأنبوبة المقفلة تنتج تردداً اساسياً يقل (اوكتافا) واحدا تقريباً ، عن ذلك التردد الأساسى الذى تنتجه الأنبوبة المفتوحة . (ويعزى البعد عن الدقة الى الاختلاف فى التصحيحات النهائية) .

٩) تدخل موجات الصوت :

يعتبر انتاج الموجات الواقفة فى الاوتار المشدودة اعمدة الهواء فى الواقع مثالا للتداخل او الأثر المتبادل لسلسلتين او أكثر من الموجات المارة فى نفس الوقت خلال نفس المنطقة و لنفحص الشوكة الرنانة المهتزة المبين مقطعها فى (شكل ٥٩) ، و هى فى الواقع مصدر مزدوج للصوت يسبب حدوث مجموعات طريفة من موجات الصوت . فعندما يتحرك الفرعان أ ، ب فى تقارب ، فانهما يضغطان الهواء بينهما ويرسلان تضاغطين : واحدا الى اعلى و اخر الى اسفل (بالنسبة للشكل) فى اتجاه المحور ١ — ١ .

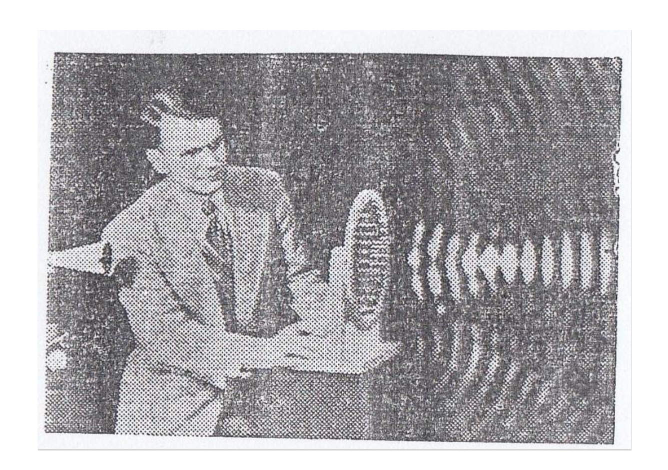


(شكل **٥٩**) صورة تبين شكل التداخل حول ساقى (ا ، ب) لشوكة رنانة مهتزة

وينشأ فى نفس الوقت ضغط منخفض فى مسار الفرعين المتحركين الى الداخل ، مما ينتج عنه ارسال نبضتى تخلخل : واحدة الى اليمين و اخرى الى اليسار على طول المحور ٢ – ٢ . ولذلك تكون الشوكة مسموعة بوضوح للأذن عندما يكون وضعهما على طول المحور ١ – ١ ، او ٢ – ٢ . ولا يسمع صوت بالمرة عند الزوايا التى تصنع ٤٥ درجة مع المحورين (اى على طول الخط ٣ – ٣ ، و الخط ٤ – ٤)، حيث ان التضاغطات و التخلخلات تمتزج مع بعضها البعض، مما يجعل محصلة اتساع الاهتزاز صفرا . ويمكن للقارىء أن يتحقق من ذلك بنفسه بأن يأخذ شوكة رنانة مهتزة و ممسوكة فى وضع رأسى، ويديرها ببطء حول محور يمر خلال ساقى الشوكة .

ونسمى نتيجة المجموعة المكونة من موجتين مختلفتين الطور تداخلاً ماحياً(destructine interference) . و يحدث هذا النوع من التداخل اذا كانت الموجات المعنية متساوية فى الطول والاتساع و تمتزج لكى تحدث فى نفس المنطقة ، و فى نفس الوقت ، تضاغطات و تخلخلات متضادة . و سوف لا تمييز الأذن الموضوعة فى هذه المنطقة اى صوت ، حيث ان محصلة اتساع الاهتزاز صفر . و من ناحية اخرى ، فاذا انضمت موجتان متساويتان فى الطول و المقدار ، بحيث يتطابق التضاغط مع التضاغط ، و التخلخل مع التخلخل ، يحدث تداخل مضاعف (constructive) اى متحد فى الطور (in-phase) وبمعنى محدد يمكن القول، ان الرنين هو تداخل مضاعف حيث انه ينطوى على مزيج من الموجات المباشرة والمنعكسة متحدة فى الطور . ومن الخطأ الشائع، ان كلمة تداخل تشير فقط الى النوع الماحى .

ويبين (شكل ٦٠) صورة لمجال صوتى يتم فحصه باستخدام ميكرفون صغير مضاء بلمبة نيون صغيرة ، و كلاهما محمول على ذراع طوله ٣ اقدام ، يتحرك رأسيا عبر المجال ، و فى نفس الوقت ، يتحرك افقياً بعيداً عن بوق الصوت و شبكة الصوت الخاصة . ويتم تكبير الصوت الذى يلتقطه الميكرفون و ترجمته الى اهتزازات فى استضاءة لمبة النيون . ويمكن فى خلال فترة تعريض مدتها ١٠ دقائق، تصوير جزء كبير من مجال الصوت تصويرا فوتوغرافيا بهذه الطريقة . وتلاحظ مناطق التداخل الماحى والمضاعف فى الصورة بوضوع (الخطوط المضيئة و المظلمة) .



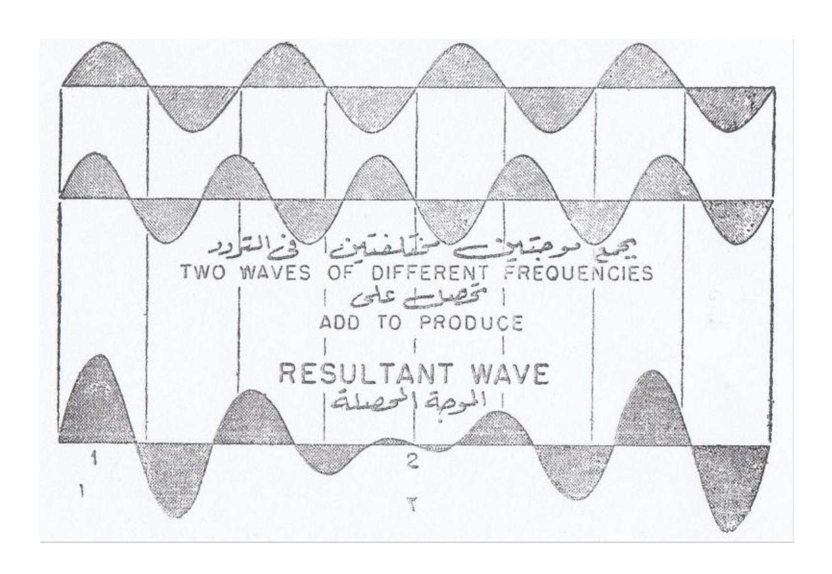
(شكل ٦٠) صورة تبين شكل تداخل موجة صوتية

ويمثل (شكل ٣١) – بطريقتين توضيحيتين مختلفتين – ظاهرة التداخل المضاعف والماحى، ويجب ان نتذكر انه خلال فترات السكون لا تنعدم طاقة الصوتيات ، ولكن ما يحدث هو مجرد تحويلها وإضافتها الى الطاقة فى مناطقاتحاد الطور. ويبقى المجموع الكلى للطاقة ثابتاً، عدا ما يفقد بسبب تأثيرات الاحتكاك ، وما نلاحظه انما هو مجرد اعادة توزيع الطاقة .

١٠) نبضات التضارب :

قم باختيار شوكتين رنانتين مركبتين على صندوق رنانين ، قادرتين على دفع اهتزازات تجاوبية مع بعضهما البعض . لف شريطا من المطاط حول فرع احدى الشوكتين . و بذلك نجد ان تردد الشوكة " المحملة " ينخفض قليلا . والآن ، قم بطرق كلا الشوكتين بطرقة من المطاط . سنلاحظ ارتفاعاً وانخفاضاً تناوبياً فى شدة الصوت ونسمى هذه النبضات

او التموج فى الصوت باسم نبضات التضارب .فاننا نشاهد الآن تدعيماً و اضعافاً تناوبياً للصوت عند ما تتناوب سلسلة الموجات الصادرة من الشوكتين التى اتحاد الطور ، وعدم اتحاده . و يبين (شكل ٦٢) ما يحدث عند امتزاج موجتين مختلفتين اختلافا بسيطا فى التردد، كل مع الاخرى. وترتبط تقوية و اضعاف محصلة الصوت ارتباطاً واضحاً مع المقدار المتذبذب للاهتزاز المركب .



(شكل ٦٢) تكوين نبضات التضارب

ويلاحظ ان الموجات تتطابق فى الطور عند النقطة ١ حيث تكون محصلة المقدار عند الحد الاقصى ، و الفرق فى طورالموجات ١٨٠ درجة عند النقطة ٢ حيث تكون محصلة المقدار صفرا و تتكرر هذه الحالات دورياً .

اذا افترضنا ان تردد احدى الشوكتين هو ٢٥٦ ذبذبة /ث و تردد الاخرى (التى تحمل شريط المطاط) هو ٢٥٤ ذبذبة / ث ، فان الشوكة ذات التردد ٢٥٦ ذبذبة / ث تنجز اهتزازتين فى الثانية زيادة على ما تنجزه الشوكة ذات التردد ٢٥٤ ذبذبة / ث ، و ستستمر فى "السبق" بالنسبة الى الشوكة البطيئة . و ينتج عن هذا مرتان من التدعيم فى الثانية عندما تتحد الموجتان ، ومرتان من الغاء فى الثانية عندما تكون الموجتان مختلفتين فى الطور تماماً . و هكذا يمكن سماع نبضتين من التضارب فى الثانية ، و هو رقم يعادل الفرق بين الترددين (٢٥٦ – ٢٥٤). واذا كان للموجتين المعنيتين نفس المقدار ، فان مقدار الموجة المحصلة يتراوح بين ضعف مقدار موجة واحدة و الصفر .

والشخص الذى يقوم بضبط تنغيم البيانو يستخدم قاعدة نبضات التضارب ، فهو يضبط شد الوتر حتى ينعدم سماع نبضات التضارب بين هذا الوتر و شوكة رنانة قياسية .

و يمكن للأذن المدربة ان تميز تردد نبضات التضارب التى تقل الى نبضة واحدة كا ٢٥ او ٣٠ ثانية . و تبقى نبضات التضارب مناسبة

عندما تحدث بمعدل يقل عن ٧ نبضات فى الثانية ، حيث يزداد الاثر التنافرى كلما ازداد تردد نبضات التضارب حتى يصل التردد الى ٢٣ نبضة فى الثانية . ويمكن احياناً سماع نغمات مجمعة تساوى مجموع الترددات المفردة .

واذا اعتبرنا نغمة ترددها ١٦ ذبذبة / ث ، فان انتاج هذه النغمة يستدعى استخدام انبوبة ارغن طويلة جدا و غالية الثمن نسبياً . و يمكننا الحصول على هذه النغمة المنخفضة التردد بوساطة

نبضات التضارب بين انبوبتى ارغن احداهما ترددها ٣٢ ذبذبة /ث والاخرى ٤٨ ذبذبة / ث .وتصنع بعض انابيب الارغن فى اطوال قريبة متدرجة بحيث يمكن الحصول على فروق تضارب تتراوح بين نبضتين وثلاث فى الثانية الواحدة بانتاج الصوت فى الانابيب المتجاورة . ويسبب ذلك حدوث الاثر المعروف باسم الصوت السماوى (voix celeste) . وفى اجهزة استقبال الراديو "السوبر هت" يتم ايجاد نغمة فرق او تضارب ترددها يساوى الفرق بين تردد الاشارة الداخلة وتردد المذبذب المحلى . و هذا التضارب فى التردد هو الذى يتم تكبيره ثم "كشفه " .

أسئلة ومسائل عن الباب الثالث

١- اذكر الفرق بين الموجات الانتقالية و الموجات الواقفة .

٢- وتر مثبت عند طرفيه يهتز لانتاج توافقه الثالث . ارسم الوتر كما يظهر لو قمنا بتصويره فوتوغرافيا بطريقة " التعويض الزمنى " ثم ارسمه مرة ثانية كما يظهر اذا صورناه بالة تصوير متعددة الوميض .

٣- هل الطول الموجى لاهتزاز وتر هو ايضا الطول الموجى للصوت فى الهواء ؟ و ضح ذلك .

٤- هل الطول الموجى لاهتزاز عمود هواء هو ايضا الطول الموجى للصوت فى الهواء ؟ اثبت صحة اجابتك .

٥- قارن بين تردد التوافق الخامس مع التردد الاساسى . ما هو اسم النغمة التوافقية المصاحبة لهذا التوافق ؟

٦- ما هو التردد الاساسى لوتر طوله ٦ اقدام مثبت عند طرفيه . اذا فرضنا ان سرعة انتشار موجة مستعرضة فى الوتر هى ٣٠٠ قدم / ثانية ؟ ما هى ترددات التوافق الثانى ؟ و الثالث ؟ و الرابع ؟

٧- انبوبة مغلقة طولها الفعال قدمان . ما هو تردد نغمتها الاساسية اذا نفخت الانبوبة فى الهواء عند درجة ٢١ مئوية ؟

٨- نفخت انبوبة مفتوحة طولها الفعال ٢,٥ قدم لانتاج التوافق الرابع فاذا فرضنا ان درجة حرارة الهواء ٢٠ درجة مئوية فما هو تردد هذا التوافق ؟ و ما هو التردد الاساس؟

٩- أنبوبة مغلقة تصدر نغمة ترددها الاساسى س ذبذبة /ث . اذكر بدلالة النغمات التوافقية الثلاث التالية ممكنة الحدوث .

١٠- أنبوبة مفتوحة تصدر نغمة اساسية ترددها ص ذبذبة / ث . اذكربدلالة ص النغمات التوافقية الثلاث التالية ممكنة الحدوث .

١١- ما هو تردد النغمة التوافقية الثالثة التى تحدث فى انبوبة مغلقة طولها قدم واحد و مملوءة بالهيدروجين ؟
(سرعة الصوت فى الهيدروجين ٤١٦٥ قدما / ثانية) .

١٢- ما هو الطول الفعال لانبوبة مفتوحة يمكنها احداث الرنين مع شوكة رنانة ترددها ٢٥٦ ذبذبة /ث عند درجة حرارة ٢٠ مئوية ؟ افترض الحالة الاساسية للاهتزاز .

١٣- اذكر الفرق بين التداخل المضاعف و التداخل الماحى؟

١٤- وضع شريط من المطاط حول فرع احدى شوكتين متماثلتين تردد كل منهما ٣٨٤ ذبذبة / ث . و لوحظ وجود ٤ نبضات تضارب فى الثانية عند دفع كل من الشوكتين الى حالة الاهتزاز . فما هو تردد الشوكة المحملة ؟

١٥- حدد طول كل من انبوبة مقفلة و انبوبة مفتوحة يمكنها الرنين مع شوكة رنانة ترددها ٢٥٦ ذبذبة / ث عند درجة درجة ٢٠ مئوية (اهمل التصحيات النهائية) .

١٦- عند طرق كل من الشوكتين م ، ن معا تحدث ٣ نبضات تضارب فى الثانية .

(ا) ما هما الترددان المحتملان للشوكة ن ، اذا كان تردد الشوكة م هو ٢٥٦ ذبذبة / ث ؟

(ب) كيف يمكن التحقق من ان اى الترددين هو الصحيح ؟

(ارشاد : حاول تحميل الشوكة ن بشريط من المطاط) .

١٧- يتم احداث الصوت فى انبوبة مغلقة طولها ٨,٢٥ بوصة ، و أخرى طولها ٨,٥٠ بوصة ، فى نفس الوقت ، فى الهواء عند درجة ٢٢ مئوية . فاذا اهملنا التصحيحات النهائية ،

فاحسب :

(ا) الطول الموجى للنغمة الاساسية الصادرة من كل انبوبة .

(ب) تردد كل من النغمتين .

(ج) تردد نبضة التضارب الناتجة .

١٨- كيف يستخدم قارِع الناقوس قاعدة الرنين عند دق ناقوس نقيل ؟

سرعة الصوت

(القيم التقريبية) عند درجة حرارة الغرفة

معادن	قدما / ثانية
الالمونيوم	١٦٧٤٠
النحاس الاصفر	١١٤٨٠
النحاس	١١٦٧٠
الحديد	١٦٨٢٠
الرصاص	٤٠٢٦
البلاتين	٨٨١٥

مواد غير معدنية :

البرافين (١٥ درجة مئوية)	٤٢٨٠
الشحم (١٦ درجة مئوية)	١٢٨٠
المطاط المقوى (صفر درجة مئوية)	١٧٧

سوائل :

الكحول ٣٨٩٠

الماء ، الخالى من الهواء ٤٧٩٤

غازات :

الهواء ١١٢٩

الامونيا (صفر درجة مئوية) ١١٣٦١

ثانى اكسيد الكربون (صفر درجة مئوية) ٨٤٦

الهيدروجين (صفر درجة مئوية) ٤١٦٥

غاز الاستضاءة (صفر درجة مئوية) ١٦٠٩

الفهرس

الفصل الثالث